

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingenieria de Petroleo



Aplicaciones de la Cementación  
Forzada en la Industria del Petróleo

T E S I S

Para Optar El Título Profesional de

INGENIERO DE PETROLEO

José Gerardo Gonzales Alarcón

PROMOCION 1987 - I

LIMA - PERU

1991

Dedico el presente trabajo  
a mis Padres y hermanos, en  
forma especial a mi esposa  
Gabriela é hijos: Bryan y  
James.

Es mucho mejor conocer algo  
acerca de todo, que todo  
acerca de una cosa. Lo uni-  
versal es siempre mejor.

## SUMARIO.

La cementación de un pozo de petróleo y/o gas constituye una operación muy importante para mejorar la productividad de un pozo. Al inicio de la industria del petróleo se tenía muchos problemas durante la perforación y completación del pozo; los que en parte fueron resueltos mediante la operación de cementación. Actualmente se han desarrollado nuevas técnicas de cementación que permiten una mejor completación del pozo, las que básicamente son tema de la presente tesis.

El éxito de una operación de cementación involucra varios factores que constituyen eslabones de una cadena, y si cualquiera de los cuales es débil origina la rotura de ella.

La preparación del pozo constituye principalmente el acondicionamiento del lodo, uso de lavadores, espaciadores, el movimiento de la sarta de tubería de revestimiento, una buena centralización y caudales apropiados para las condiciones del pozo; todo esto para facilitar la remoción de la costra de lodo y lograr una buena adherencia del cemento a la tubería de revestimiento y la formación.

Los fluidos de cementación son también tan importantes como los productos que los componen para los requisitos solicitados. No se debe olvidar que la ejecución de la operación es un eslabón como los otros que no debe ser débil, y que pese

a que pueda resultar rutinario, siempre se debe corregir los pequeños detalles operativos para asegurar el éxito de la operación.

Por lo general, la cementación ha sido mejorada progresivamente mediante el uso de aditivos que permiten obtener varios tipos de lechadas de cemento, las que se pueden ajustar a los requerimientos deseados para solucionar el tipo de problema encontrado en un pozo particular.

Asimismo, se han desarrollado técnicas de aplicación que permiten mejorar el desplazamiento y colocación de la lechada de cemento en la zona problema.

## INDICE

### **1.- INTRODUCCION**

### **2.- CONCEPTOS Y TERMINOLOGIA DE LA CEMENTACION FORZADA**

2.1 CONCEPTOS DE LA CEMENTACION FORZADA

2.2 TERMINOLOGIA DE LA CEMENTACION FORZADA

### **3.- TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA**

3.1 CEMENTACION FORZADA A BAJA PRESION

3.2 TECNICA DE CEMENTACION FORZADA BRADEN HEAD

3.3 TECNICA DE CEMENTACION FORZADA CON "PACKER"

3.4 TECNICA DE CEMENTACION FORZADA CON HESITACION

3.5 TECNICA DE CEMENTACION FORZADA CORRIDA

### **4.- TAPONES DE CEMENTO**

4.1 TAPON BALANCEADO

4.2 EJEMPLO DE APLICACION

### **5.- LA LECHADA DE CEMENTO EN CEMENTACION FORZADA**

5.1 CONSTITUYENTES Y REACCIONES

5.2 TIPOS DE LECHADAS DE CEMENTO

5.3 REOLOGIA DE LAS LECHADAS DE CEMENTO

DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO

## **6.- PROCEDIMIENTO OPERACIONAL DE UNA CEMENTACION FORZADA**

6.1 LIMPIANDO LAS PERFORACIONES

6.2 PRUEBA DE INYECCION

6.3 MEZCLANDO EL CEMENTO

6.4 UBICACION DEL CEMENTO

## **7.- SELECCION DE LA COMPOSICION DE LA LECHADA DE CEMENTO MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA CONDICIONES EN EL NOROESTE Y SELVA PERUANA**

7.1 TIEMPO DE ESPESAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO

7.2 CONTROL DEL FILTRADO DEL CEMENTO

7.3 RESISTENCIA A LA COMPRESION

7.4 CONTRACCION DEL CEMENTO DESPUES DEL FRAGUADO

7.5 PERMEABILIDAD DEL CEMENTO

7.6 ENDURECIMIENTO DEL CEMENTO

7.7 TIEMPO DE FRAGUADO

## **8.- RESULTADOS DE CAMPO Y EVALUACION ECONOMICA**

## **9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **10.-BIBLIOGRAFIA**

## **11.-ANEXOS**

## 1.- INTRODUCCION

Como paso previo al estudio de los problemas que pueden ocurrir en una cementación forzada es necesario revisar los conceptos básicos de dicha técnica.

La cementación forzada, es un proceso en el cual se obliga a una lechada de cemento a penetrar en un espacio vacío o poroso de una formación o en el "wellbore" de un pozo, mediante la aplicación de una presión hidráulica actuante desde superficie, ya sea a hueco abierto o a través de las perforaciones en la tubería de revestimiento o línea.

La aplicación y beneficios de esta técnica ha sido y se hace, entre otras razones, para:

**Eliminar altas razones GOR:** de forma tal que la zona de petróleo se aisle de una zona de gas adyacente, permitiendo conservar el gas que ayudará a mejorar la recuperación de petróleo.

**Impedir el exceso de producción de agua:** arenas acuíferas debajo de una zona productora de petróleo pueden ser bloqueadas total o parcialmente a través de una cementación forzada y controlar las relaciones agua/petróleo. Con el propósito de impedir la intrusión de agua zonas acuíferas independientes pueden aislarse mediante cementación forzada.

**Reparación de roturas de tubería de revestimiento("casing"):**

un "casing" roto puede ser reparado mediante una cementación forzada a través de la rotura.

**Eliminar zonas ladronas o de pérdida de circulación:**

zonas de baja presión en un pozo que admiten gas, petróleo, o fluidos de perforación son normalmente selladas con cementación forzada.

**Block "squeezing" o cementación forzada por bloqueo:**

para lograr una mayor protección contra la migración de fluidos de una zona productiva es a menudo posible perforar debajo de esa zona, realizar cementación forzada por esas perforaciones, repetir el proceso encima de la zona, perforar el cemento remanente en el pozo y luego abrir a producción la zona de interés.

**Completaciones de tipo permanente:**

después de forrado un pozo con un potencial productivo de múltiples zonas, es práctica común en muchas áreas (debido a los diferentes tipos de crudos producidos), entre otras cosas, seleccionar cada una de las zonas, aislarla con cementación forzada y producirla hasta depletarla, luego con el mismo procedimiento producir cada una de las zonas remanentes.

**Corregir trabajos de cementación primaria defectuosos:**

canalizaciones o insuficiente llenado del cemento pueden

usualmente ser superados mediante cementación forzada.

**Abandono:** la cementación forzada es algunas veces empleada para sellar perforaciones antiguas o poner un tapón en una zona productiva depletada completada ahueco abierto. Que ayudará a prevenir la migración de fluidos del pozo o zona abandonada.

**Taponear todo o parte de una o mas zonas en un pozo inyector con múltiples zonas:** para dirigir la inyección dentro de los intervalos deseados.

## **2.- CONCEPTOS Y TERMINOLOGIA DE LA CEMENTACION FORZADA**

### **2.1.CONCEPTOS DE LA CEMENTACION FORZADA**

Hay muchos conceptos que han sido usados para explicar qué sucede en una cementación forzada.

Algunos de esos conceptos iniciales erróneos son:

a)El cemento a presión atravieza los huecos o perforaciones del "casing" a muy altas presiones formando una torta de masa opuesta a los huecos, con lo cual se desarrolla una barrera vertical opuesta al movimiento de los fluidos.

b) una alta presión final en una cementación forzada es una indicación positiva de un trabajo exitoso.

c) Al cortarse la inyección de lodo automáticamente se abren todas las perforaciones.

d) En zonas con buena permeabilidad, el total de la lechada de cemento entra a la formación sin fracturarla.

Conceptos modernos sobre cementación forzada han demostrado que es el filtrado del cemento y no la totalidad del cemento el que entra a la formación. El sello inicial es la costra del filtrado del cemento formado por las partículas sólidas que quedan fuera en la cara de la formación, cuando el filtrado es forzado a entrar dentro de la formación permeable.

La cementación forzada o cementación de remedio es una operación donde la lechada de cemento es inyectada o forzada dentro de espacios vacíos o evacuados de la formación o en el anillo del "casing" o wellbore a través de las perforaciones o huecos del "casing", para propósitos de remedio.

Diferente de otros procesos de cementación, tales como sentar un tapón o cementación primaria del "casing", que son realizadas sin aplicar presión diferencial al cemento instalado, la cementación forzada lograda aplicando

presión diferencial a la lechada de cemento.

El objetivo es llenar todas las perforaciones o canales detrás del "casing" con cemento para obtener un sello entre el "casing" y formación. Normalmente, sólo un relativo volumen pequeño de cemento es requerido y deberá ser instalado alrededor del pozo. En realidad es raro encontrar todas las perforaciones abiertas y receptivas a fluidos, lograrlo requiere un considerable esfuerzo.

En el pasado una alta presión final en la cementación forzada se consideraba como una indicación positiva de éxito en el trabajo. Sin embargo, una presión final alta puede ocurrir debido a que el cemento se ha deshidratado y se tienen puentes detrás del "casing" o perforaciones. También las costras de filtrado de lodo son capaces de soportar alta presión diferencial. Por tanto, no siempre alta presión final en la cementación forzada significa trabajo exitoso.

En el caso donde el cemento en el anular contiene canales de fluido o filtrado de lodo, el cemento será depositado en los canales desplazando al fluido o filtrado de lodo.

#### **4.2.-TERMINOLOGIA DE LA CEMENTACION FORZADA**

**Breakdown:** Significa quebrar o fracturar una formación. Para los objetivos de una cementación forzada el "Breakdown" es

un término no deseado, ya de lo que se trata es de obturar los huecos o perforaciones haciendo que éstos admitan lechada de cemento en forma uniforme sin quebrar o fracturar una formación.

Una fractura generalmente admitirá lechada de cemento en grandes volúmenes pero no necesariamente se ubicará en la zona requerida. Asimismo, requiere mayores volúmenes de lechada de cemento y tiempo de operación, con lo cual se incrementan los costos.

De manera que lo aconsejable es antes de hacer un trabajo de cementación forzada, establecer una presión de ruptura mediante una prueba de inyectividad y no pasarse de ese límite, asegurando que la formación tomará filtrado de cemento y nó la totalidad del cemento.

**Gradiente de fractura:** Está íntimamente relacionado con la prueba de inyectividad, parámetro que permite establecer el valor de la presión de ruptura de la formación. Una vez iniciada la fractura, la extensión de la misma mayormente requiere menor presión que la de su creación.

Frecuentemente, se señala que, para poder quebrar una formación, es necesario levantar la presión a la presión de sobrecarga "overburden" (litostática). También se asume que dada la densidad promedio de las formaciones, se puede an-

ticipar una gradiente de fractura no menor de 1 psi por pie de profundidad.

Este es un número redondo y de fácil aplicación en los cálculos, pero en la práctica se tiene que, debido tanto a los esfuerzos estructurales de la corteza terrestre como a las propiedades elásticas de las rocas, pueden producirse fracturas a valores tan bajos como 0.6 psi/pie, básicamente a mayores profundidades.

Lo último se debe a que las fracturas se producen perpendiculares a la dirección del menor esfuerzo que en este caso de formaciones profundas no es la litostática.

Todas las formaciones a mayor profundidad de 3,000' si son fracturadas producen fracturas verticales y a menor profundidad horizontales.

La geometría de la fractura dependerá del "rate" del fluido de inyección y de las características de viscosidad y pérdida de fluido.

El fracturamiento de la formación durante cementación forzada a alta presión puede ser contraproducente debido a la posibilidad que se forme una gran fractura vertical a través de los contactos gas o agua, cuando se realizan trabajos de cementación forzada para aislar cualquiera de

dichas zonas de la zona de petróleo. Una vez creada la fractura debe ser sellada con cemento pero es difícil de lograrlo porque la fractura es inicialmente creada con lodo al que hay que intentar purgarlo.

Otro problema es que lodo que llene las perforaciones puede permanecer en él a grandes presiones diferenciales. También todas las perforaciones pueden no ser forzadas a abrirse cuando la formación es fracturada por alta presión. Muchos trabajos de cementación forzada fallidos se atribuyen a la no limpieza de las perforaciones taponeadas con lodo después del trabajo de cementación forzada.

**Presión de tratamiento en el fondo del pozo:** Resulta de la sumatoria de la presión de superficie, la presión hidrostática de la columna de tratamiento en el momento del trabajo menos las pérdidas por fricción.

Siendo no deseable fracturar una formación y que ésta puede fracturarse a una presión menor que la generalmente calculada, el problema que se requiere definir es el de la presión de operación máxima que se puede usar con seguridad.

Esta presión será la gradiente multiplicada por la profundidad.

$\text{Grad.} \times \text{Profundidad} = \text{Presión cabeza} + \text{presión hidrostática} - \text{pérdidas por fricción.}$

En una cementación forzada las pérdidas de presión por fricción son despreciables debido a los bajos "rates" de bombeo. Sobre esta base, la máxima presión de bombeo en superficie será igual a la presión de tratamiento en el fondo del pozo ( $\text{Gradiente} \times \text{Profundidad}$ ) menos la presión hidrostática ejercida por los fluidos bombeados, menos un factor de seguridad conveniente, el que generalmente se considera 500 psi.

### **3.-TECNICAS DE CEMENTACION FORZADA.**

Ellas son generalmente definidas por las presiones obtenidas que pueden ser altas o bajas y por los tipos de obturadores ("packers") permanentes o recuperables a ser usados.

**3.1.- Cementación Forzada a Baja Presión:** Es realizada cuando la presión del fluido en el hueco del pozo se mantiene por debajo de la presión de fractura de las formaciones expuestas, antes y durante el tiempo que la lechada de cemento esté en contacto con las formaciones. En la práctica, la presión en el trabajo de cementación forzada está entre 300 á 1000 psi debajo de la presión de fractura.

En cementación forzada baja presión, el cemento es dirigido a través de los intervalos perforados aplicando presión suficiente para formar una costra de filtrado de cemento deshidratado en las perforaciones y en los canales o

fracturas que pueden ser abiertas a las perforaciones. Baja pérdida de fluido de cemento (50 a 100 cc/30 min API de pérdida de fluido) y retrabajos con fluidos de limpieza deben ser usados.

El uso de lechadas de cemento con baja pérdida de fluidos reduce el "rate" de deshidratación no permitiendo puentes y forzando a la lechada de cemento a lo largo de los intervalos abiertos o canales.

El procedimiento para una cementación forzada a baja presión es como sigue:

- 1) Iniciar la inyección. Determinar la presión de inyección hueco abajo. Si el "rate" de inyección es muy pobre o muy bajo a la máxima presión permisible sin fracturar la formación, realizar un trabajo de acidificación para mejorar la inyección.

- 2) Circular lechada de cemento en la localización deseada en el "casing".

- 3) Aplicar presión moderada de cementación forzada. Tener en cuenta que la lechada de cemento incrementa la presión hidrostática.

4) Restaurar la presión "squeeze" ajustando la bomba cuando ocurre el desangrado.

5) Gradualmente incrementar la presión hueco abajo de 500 a 1000 psi encima de la presión requerida para iniciar el flujo. Cuando el desangrado cesa por alrededor de 30 minutos parar el desplazamiento de la lechada de cemento y levantar la presión. No exceder la máxima presión de "squeeze" permisible.

6) Mediante circulación reversa extraer del "casing" el exceso de cemento o levantar el "packer" y la sarta de trabajo dejando el cemento que será posteriormente perforado.

**3.2.- Técnica De Cementacion Forzada "Braden Head":** Es el original e inicial método de cementación forzada. Se efectúa a través del "tubing" o "drill pipe" sin el uso de "packer".

Una vez que la lechada de cemento es circulada a la zona a ser squeezada (calculado por la cantidad de fluido desplazado) el "drill pipe" o "tubing" es levantado encima del cemento y perforaciones. El BOP (impide reventones) es cerrado para evitar el flujo del anillo, aplicándose presión al "drill pipe" o "tubing" y forzando a que la lechada de cemento se deshidrate contra la formación. El exceso de cemento en la sarta de trabajo y "casing" puede ser sacado por

circulación reversa o perforación posterior después que el cemento ha sido colocado.

El método es de uso extensivo en trabajos de cementación forzada a pozos superficiales donde se requieren bajas presiones.

Sus desventajas son:

- 1) No es una técnica precisa para ubicar el cemento.
- 2) No puede ser aplicada donde existen diversos intervalos abiertos y solamente una debe ser "squeezada" o donde el "casing", encima de la zona de interés, no soporta presiones altas.

**3.3.- Técnica De Cementacion Forzada Con "Packer":** En esta técnica un "packer" de "squeeze" recuperable o no-recuperable (perforable) es corrido sobre el "tubing" o "drill pipe" en una posición cerca de la zona a ser squeezada. En algunas ocasiones, la sección debajo de la zona a ser trabajada con cementación forzada es aislada con un tapón puente.

El procedimiento es el siguiente:

- a) Correr el "packer" a la profundidad deseada, sentar el "packer" y realizar una prueba de presión a través

del anillo para asegurarse que no falla.

b) Realizar la prueba de inyección para determinar la presión de ruptura de la formación. Dejar de sentar el "packer".

c) Mezclar y desplazar el cemento a la zona deseada a ser squeezada. El cemento puede justamente ser desplazado hasta alcanzar el final del "drill pipe" o "tubing" o puede ser colocado frente a la zona a ser squeezada.

d) Sentar el "packer" y aplicar presión hasta que la presión deseada de "squeeze" es obtenida. El "packer" será sentado 30-60' de las perforaciones y encima de la lechada de cemento, para prevenir que el "packer" sea mojado por el cemento.

e) EL exceso de cemento puede ser sacado por reversa o dejado para ser perforado posteriormente.

Las principales ventajas de la técnica "squeeze" con "packer" son:

1) La lechada de cemento puede ser precisamente ubicada frente a la zona a ser squeezada.

2) Contraflujo e interrupción de la formación de costra de filtrado es prevenida.

3) Las perforaciones son aisladas de presiones de circulación encima del "packer".

4) "Packers" recuperables pueden ser sentados extraídos repetidamente en un sólo viaje, tanto como se requiere ubicar huecos o perforaciones en el "casing".

5) Puede ser usado para cementación forzada a bajas o altas presiones.

6) Es posible "squeeze" múltiples zonas en el mismo viaje si el tapón puente recuperable y el "packer" son corridos juntamente.

La localización del "packer" es extremadamente importante y debe ser cuidadosamente considerada en cualquier trabajo. Si el "packer" es sentado demasiado lejos de las perforaciones, volúmenes excesivos de fluidos de "workover" o lodo serán desplazados de la formación delante de la lechada de cemento o la lechada de cemento puede ser canalizada a través del lodo.

También un "packer" demasiado cerca de las perforaciones puede untarse de cemento o colapsar el "casing" la presión sobre el lado externo del "casing" es transmitida encima del "packer".

El mejor procedimiento que se sigue cuando se usa la técnica de cementación forzada con "packer" es correr una tubería de cola (tail pipe) extendida desde debajo del "packer" encima de las perforaciones al fondo de las perforaciones. El cemento es colocado a través de las perforaciones. Luego se levanta la tubería de cola (tail pipe) fuera de la lechada de cemento y encima de las perforaciones. Se sienta el "packer" y la presión de "squeeze" aplicada.

**3.4.- Técnica De Cementacion Forzada Con "Hesitation"**. Esta técnica puede usarse ya sea en aplicaciones con alta o baja presión. El aspecto principal de la técnica es alternar el bombeo ("hesitation") con la idea principal de estimular la formación de costra de filtrado de cemento.

No es una ciencia exacta sino un arte, debido a que el tiempo de "hesitation" y presión cambian durante el bombeo y las esperas son de acuerdo con las experiencias observadas y variadas. La alternativa de bombeo y "hesitation" se continúa hasta que la presión final de "squeeze" es lograda.

El método es mayormente aplicable en "squeezes" a bajas presiones, cuando la presión de "squeeze" alcanza rápidamente su máximo permisible antes de que un monto apreciable de lechada de cemento es squeezada. Para poder squeezez más cemento, será necesario parar el bombeo, esperar que la presión caiga debajo de la presión de "squeeze" máxima y reiniciar el "squeeze" con más cemento.

**3.5.- Técnica De Cementacion Forzada Corrida:** A diferencia de la técnica de cementacion forzada con "hesitation" esta técnica es lograda por inyección continua de lechada de cemento hasta que la presión final de "squeeze" es lograda.

Ella puede ser usada con "squeezes" a altas o bajas presiones.

#### **4.- TAPONES DE CEMENTO**

Con relación a los tapones de cemento, se hará una revisión de los problemas técnicos en áreas donde se lo emplea para taponamiento de perforados.

**Razones para taponar:** Los tapones de cemento son usados en los pozos por variadas razones.

En estas operaciones, los problemas generalmente presentan en la etapa de fraguado de las mismas, pero se

derivan y son originados durante la etapa del desplazamiento como resultado de la contaminación y disolución de lodo en el cemento.

Los tapones de cemento son siempre usados durante la vida productiva de un pozo y la técnica de su colocación es variada pero sin duda controlada.

Las razones básicas para la aplicación de un tapón de cemento son:

- a) Aislamiento de una zona
- b) El control de una pérdida de circulación
- c) Desvío lateral o perforación direccional (no inherente a las operaciones de producción)
- d) Pruebas de formación
- e) Abandono

**Aislamiento de una zona:** A veces por razones económicas y de producción en un pozo con dos o más zonas de producción, es beneficioso abandonar una zona, colocándose un tapón de cemento encima de ella para evitar una posible pérdida de producción, o también una posible pérdida en la calidad del producto obtenido debido a la mezcla de un petróleo de menor valor con otro de superior condición.

**Control de pérdida de circulación:** Durante una operación, tanto en la etapa de perforación como de producción, si existe una pérdida de circulación, será posible restaurarla colocándose un tapón de cemento en la zona ladrona y encima de él.

**Desvío lateral o perforación direccional:** Para desviar lateralmente la perforación alrededor de una "herramienta perdida definitivamente" que obliga a la perforación propiamente dicha a una parada, ocasionando la obligación de poner un tapón de cemento a una profundidad específica para ayudar a soportar la columna, permitiendo así la orientación de la broca con una desviación determinada.

**Pruebas de formación:** Por falta de soporte no siempre es práctico probar por el método "straddle" o con un "straddle packer" , para soportar el peso de la columna a veces es necesario un tapón de cemento inmediatamente abajo de la zona a ser probada, por ser más económico y conveniente para el éxito de la operación.

**Tapones de abandono:** Para sellar formaciones no productivas o depletadas, un tapón de cemento colocado a la profundidad necesaria ayudará a evitar comunicación de zonas que producen fluidos no deseados.

En toda operación referente a la colocación de tapones de cemento, representa un problema la pequeña cantidad de cemento en relación con el volumen de fluidos que soporta un pozo.

La contaminación proveniente de esta diferencia, puede ocasionar una colocación pobre y diluida que impide muchas veces la fragua del mismo. Cuando se coloca un tapón de cemento, la contaminación del cemento con lodo afecta el desarrollo de la resistencia de la lechada de cemento por la disolución que ésta tiene y por el efecto de retardación de las químicas usadas en el tratamiento de lodo. Las lechadas de cemento más pesadas toleran mejor la contaminación; por esta razón es que son más usadas cuando se taponan una zona.

En áreas productivas, un tapón de cemento puede ser necesario debido a:

- a) Una cementación primaria pobre
- b) Contaminación del cemento debido a la utilización de pequeños volúmenes.
- c) Mezcla de cemento no uniforme.
- d) Dificultades en mezclar pequeños volúmenes de cemento.

e) Cálculo equivocado en la colocación de un tapón.

**4.1 TAPON BALANCEADO:** El procedimiento operativo para su cálculo es el siguiente:

Usando el Manual de Datos de Campo, se encuentra el volumen en barriles por pie lineal tanto para el espacio anular como la tubería o tubo de perforación. La relación del volumen de la tubería con el volumen anular es un factor conveniente para el balanceo de las columnas de fluido. Esta se encuentra dividiendo el volumen de la tubería entre el volumen del anular. Después de determinar el volumen del espaciador, el lavador químico o el agua que se va a usar antes de la lechada de cemento, multiplicar dicho volumen por la relación tubería-espacio anular. El resultado es el volumen del fluido que debe usarse en la tubería detrás de la lechada de cemento para balancear la columna del espacio anular.

Pasos para balancear un tapón de cemento:

1) Volumen de la lechada de cemento en pies cúbicos y número de sacos requeridos:

$$\begin{aligned} \text{Volumen} &= \text{longitud del tapón (pies)} \times \text{volumen del hueco} \\ &= \text{pies}^3 / \text{pies} \times \% \text{ de exceso} \end{aligned}$$

pies<sup>3</sup> de lechada

sacos de cemento =  $\frac{\text{pies}^3 \text{ de lechada}}{\text{rendimiento de la lechada}}$

2) Lavador quimico del balance

barriles de lavador x relación  $\frac{\text{volumen tubería barriles}}{\text{vol.tb.revest. agua}}$  = de

3) Cálculo de la altura de la columna de cemento balanceada antes de sacar la tubería :

H =  $\frac{\text{volumen de lechada en pies}^3}{\text{vol. anular pies}^3/\text{pie} + \text{vol. tb. pies}^3/\text{pie}}$

4) Volumen del desplazamiento de lodo = V.D. LODO

V.D. LODO = [(longitud tubería - H) x vol.tb (bb1/pie)] -  
- barriles de agua de 2)

#### 4.2 EJEMPLO DE APLICACION:

#### TAPON BALANCEADO PARA CONTROL DE AGUA

POZO: ZA - 7174

## 1.- DATOS DEL POZO

A) Tubería de perforación 4 ½ " 16.6 lb/pie

Diámetro externo 4 ½ "

Diámetro interno 3.826 "

Capacidad 0.01422 bbl/pie

Capacidad 0.07984 pie<sup>3</sup>/pie

B) Tubería de perforación 4 ½ " - Diámetro del pozo 10 "

Capacidad 0.0775 bbl/pie

Capacidad 0.4350 pie<sup>3</sup>/pie

C) Diámetro del pozo 10 "

Capacidad 0.0971 bbl/pie

Capacidad 0.5454 pie<sup>3</sup>/pie

D) Longitud de la tubería 2,200'

## 2.- CALCULO DE LA CANTIDAD DE CEMENTO

para colocar un tapón de 700' se requiere:

$$700' \times 0.5454 \text{ pies}^3/\text{pie} \times 1 \text{ sk}/1.43 \text{ pie}^3 = 267 \text{ sacos}$$

## 3.- ALTURA DEL TAPON

Volumen de lechada =  $267 \times 1.43 \text{ pie}^3/\text{sk} = 382 \text{ pie}^3$

Aplicando la ecuación respectiva:

$$H = \frac{382 \text{ pie}^3}{0.435 + 0.07984} = 742 \text{ pies}$$

\* AGUA POR DETRAS

Agua por adelante = 10 barriles

Agua por detrás =  $10 \times 0.01422 / 0.0775 = 1.8 \text{ barriles}$

#### 4.- DESPLAZAMIENTO

Usando la debida fórmula:

$$( 2,200 - 742 ) \times 0.01422 = 20.7 \text{ barriles}$$

por lo tanto :  $20.7 - 1.8 = 18.9 \text{ barriles}$

se requiere aproximadamente 19 barriles de lodo para colocar el tapón y sellar la entrada de agua.

En Total se requiere 20.7 barriles de fluido entre agua y lodo para balancear el tapón.

## 5.- LA LECHADA DE CEMENTO EN CEMENTACION FORZADA.

**5.1.- Constituyentes y reacciones:** Las lechadas de cemento son formadas por dos componentes principales agua y cemento, a los cuales se incorporan pequeñas cantidades de aditivos para modificar sus características. La mezcla no es estable, apenas formada se inicia una serie de reacciones físico-químicas complejas que modifican su consistencia, pasando de un estado fluido inicial a un estado sólido final, irreversible, en un tiempo relativamente corto.

La composición de un cemento anhidro no es fija, variando entre ciertos límites. En la Tabla I (Ver Anexos) se tiene el análisis de dos tipos de cemento de dichas características.

Realizado el proceso físico-químico de clinquerización, resultan en compuestos complejos en las proporciones dadas por la Tabla II (Ver Anexos).

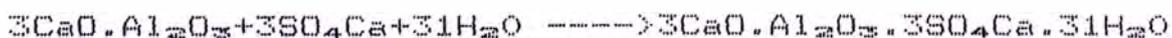
Los silicatos tricálcico y dicálcico forman aproximadamente las 3/4 partes de los constituyentes del cemento.

Los cementos retardados se caracterizan por tener bajo contenido de aluminato tricálcico y mayor contenido de aluminato tetracálcico.

El proceso de hidratación de los componentes del cemento en presencia de agua es exotérmico, desprendiendo calor. Al cabo del cual, en procesos complejos resultan compuestos estables.

En condiciones normales de temperatura, la hidratación tiene lugar en tres etapas, cada una de las cuales tiene un efecto térmico de diferente intensidad.

**a)Empaste con agua:** Se produce de inmediato al contacto con el agua, observándose una importante elevación de temperatura del orden de 0.4 calorías por gramo y por minuto, por el espacio aproximado de 15 minutos relacionado con la rápida reacción del aluminato tricálcico. Esta reacción se atenúa por la presencia de sulfato en solución, proveniente del yeso, que forma sulfoaluminato tricálcico, conforme a la ecuación.



La formación de sulfoaluminato tricálcico origina retardo en el tiempo de fraguado, ligado a la solubilidad del  $\text{SO}_4\text{Ca}$  y del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Los elementos superficiales del cemento se solubilizan hasta la saturación del agua de hidratación.

**b)Período inicial del fraguado:** Se extiende por un período de 3 a 10 horas, después que la saturación del agua de hidratación por cemento ocurre. Se desprende calor de 40 a 50 calorías por gramo y por minuto debido a la hidratación de los silicatos.

La hidratación se atenúa paulatinamente a medida que disminuye la superficie de los granos anhidros y se registra un aumento de resistencia por la formación de un gel compuesto por silicatos.

**c)Período final del fraguado:** Comienza cuando la transformación del yeso en sulfoaluminato tricálcico se hace importante y corresponde a la hidratación total de los aluminatos que queden por reaccionar.

Las etapas no se realizan en forma selectiva, las reacciones se inician simultáneamente y están determinadas por el tamaño de las partículas (superficie efectiva) y por la presencia de materias orgánicas que, absorvidas por la superficie de las partículas, modifican las reacciones de hidratación.

De otro lado, el proceso de hidratación es acelerado con la presión y temperatura.

Para la cementación las dos primeras etapas del proceso de hidratación son las importantes por el rápido aumento de la temperatura de la zona cementada cuando aún el cemento no ha

alcanzado su resistencia final.

La Tabla III (Ver Anexos) es un resumen de las reacciones aceptables.

**5.2. Tipos de lechadas de cemento:** Con el objeto de uniformizar criterios y establecer bases de comparación del comportamiento de las lechadas de cemento aptas a la industria del petróleo se tiene normas API que señalan clases y tipos de cementos y sus requisitos físico-químicos.

Dicha clasificación es :

**Clase A.**- Desarrollados para ser usados hasta 6000' de profundidad (170°F), cuando no se requiere de condiciones especiales.

**Clase B.**- Desarrollados para ser usados hasta 6000' de profundidad (170°F), cuando se requiere de una moderada resistencia al sulfato.

**Clase C.**- Usados hasta 6000' de profundidad (170°F), cuando se requiere de una alta resistencia al sulfato y rápida resistencia del cemento.

**Clase D.**- Usados en profundidades que varían de 6000' a 12000' (260°F), con altas temperaturas y presiones.

**Clase E.**—Desarrollados para ser usados en profundidades que varían de 6000' a 14000' (290°F), con altas temperaturas y presiones.

**Clase F.**—Desarrollados para ser usados en profundidades que varían de 10000' a 16000' (320°F), con altas temperaturas y presiones.

**Clase G.**—Usados hasta 8000' de profundidad (200°F), con condiciones básicas.

En la Tabla VI (Ver Anexos) se resume los requisitos químicos de los cementos utilizados en la industria del petróleo.

**5.3.- Reología de las lechadas de cemento:** Las lechadas de cemento son fluidos no-newtonianos, de manera que para poder predecir su comportamiento hidráulico no sólo se requiere del parámetro viscosidad.

Estudios realizados durante las primeras horas de hidratación de las lechadas de cemento determinaron curvas R.P.M vs. momentos de torsión, con velocidades crecientes y decrecientes.

Con estos registros se evaluaron parámetros tales como: punto de cedencia ("yield point") y viscosidad plástica, relacionándolas con las siguientes variables de las lechadas de ce-

mento:

- Composición química de los cementos
- Condiciones de mezcla
- Superficie efectiva y temperatura de hidratación

Los resultados obtenidos mostraron tres tipos de comportamiento reológico:

**A) Antitixotrópico:** Comportamiento correspondiente a lechadas de cemento recién preparadas, con vigorosa agitación y poco tiempo de hidratación. Presenta como característica una curva de fluencia o fluidez descrita en la Figura 1, en la cual la porción descendente (disminución de las r.p.m.) está al lado derecho de la curva ascendente (aumento del r.p.m.).

**b) Reversible:** Comportamiento correspondiente a lechadas de cemento que fueron dejadas hidratarse durante 45 minutos y en donde ocurre la superposición de las curvas ascendente y descendente.

**c) Tixotrópico:** Predominante en las lechadas de cemento y en donde la curva ascendente está al lado derecho de la curva descendente.

La Figura 1 (ver Anexos) muestra la representación de los tres tipos de comportamiento reológico.

La tixotropía es una característica del gel que se forma por la hidratación de los silicatos de calcio del cemento, los cuales están integrados por partículas en forma de placas o fibras en contacto en algunos puntos. El orden de las partículas floculares, conduce a un reticulado tridimensional de sólidos en un medio líquido.

El proceso de fraguado se inicia una vez formada una cantidad suficiente del gel que permita aumentar los valores del punto de fluidez y viscosidad plástica de las lechadas de cemento a un grado característico.

El proceso de fraguado puede modificarse por eliminación del agua, ya sea por evaporación o reacción química. De esta manera el aluminato tricálcico aumenta la consistencia de las lechadas de cemento.

Los parámetros reológicos están relacionados con índices que definen al fluido en una técnica analítica de un procedimiento normalizado.

Así se tiene:

- a) Índice de comportamiento del fluido ( $n'$ )
- b) Índice de consistencia del fluido ( $K'$ )

En el viscosímetro estos valores están dados por:

$$n' = 3.32 \log \frac{\text{lect.600 rpm}}{\text{lect.300 rpm}}$$

$$K' = \frac{\text{lect.300 rpm}}{100 \times 479 \times n'}$$

$$VP = \text{lect.600 rpm} - \text{lect.300 rpm.}$$

$$YP = \text{lect.300 rpm} - VP$$

Donde:

VP = Viscosidad Plástica.

YP = Punto de cedencia (yield point).

**5.4.- Diseño de una lechada de cemento:** Los siguientes son los factores a ser considerados cuando se diseña una lechada de cemento en un "squeeze":

- a) Control de pérdida de fluido
- b) Volumen de lechada de cemento
- c) Presión de "squeeze"
- d) Tiempo de espesamiento
- e) Tipo de fluido de "workover" o lodo

**5.4.1.- Control de Pérdida de Fluido:** El éxito de un trabajo de cementación forzada depende de la deposición de costra de filtrado del cemento en aberturas entre "casing" y formación.

Para ello es necesario controlar la pérdida de filtrado del cemento.

Si la pérdida de fluido es demasiado alta, el cemento puede deshidratarse muy rápido y formar puentes en las porciones superiores del intervalo perforado antes que la lechada de cemento sea desplazada a las perforaciones inferiores.

Inversamente, muy baja pérdida de fluido puede resultar en muy lento desarrollo de costra del filtrado del cemento e inaceptables operaciones tienen lugar.

Los factores que afectan el "rate" de desarrollo de la costra de filtrado del cemento son:

- 1) Relación pérdida de filtrado de fluido y agua-sólidos
- 2) Permeabilidad de las formaciones
- 3) Presión de "squeeze"

Agentes o aditivos de control de pérdida de fluido están disponibles para controlar la pérdida de fluido de una lechada de cemento. La pérdida de filtrado API cubre rangos para cemento puro que van de 600 cc á 2500 cc en 30 minutos

y la deshidratación puede ocurrir tan rápidamente que es difícil medirla. Es posible reducir la pérdida de fluido a valores tan bajos como 25 á 100 cc en 30 minutos con la adición de adecuados aditivos que controlan la pérdida de fluido.

A mayor razón agua-sólido en una lechada de cemento es más alta la pérdida de fluido. Consecuentemente, la menor razón agua-sólido resulta en menor pérdida de fluido en una lechada de cemento.

PERDIDA DE FLUIDO VS PERMEABILIDAD DE LA COSTRA DE FILTRADO  
Y "RATE" DE FORMACION DE LA COSTRA DE FILTRADO DEL CEMENTO

pérdida de fluido API a 1000 psi (cc/30 min)	permeabilidad de costra filtrado (md)	Tiempo para formar 2" de costra (min)
1200	5.00	0.2
600	1.60	0.8
300	0.54	3.4
150	0.19	14.0
100	0.09	30.0
50	0.009	100.0
25	0.006	300.0

Rápida deshidratación de lechada de cemento ocurre cuando se está en contacto con arenas permeables o formaciones con muy buena permeabilidad. Cuando se realiza cementación forzada contra lutitas, calizas densas, dolomitas o formaciones permeables donde la permeabilidad natural es taponeada con lodo, una muy baja pérdida de fluido puede no ser deseable.

Cuanto mayor es la presión diferencial aplicada a una lechada de cemento, mayor es el monto de fluido que puede perderse. De aquí que, cuando diseñamos una lechada de cemento para una operación "squeeze" a alta presión, una lechada de cemento con baja pérdida de fluido es preferible, así como una lechada de cemento con alta pérdida de fluido se requiere para trabajos de cementación forzada en "squeezes" a baja presión.

**5.4.2.- Volumen de la Lechada de Cemento:** La cantidad de cemento a ser usado en un trabajo de cementación forzada varía y cubre rangos de unos cuantos a varios cientos de sacos en un más dificultoso y grande trabajo. Usualmente el rango promedio es entre 100 á 200 sacos.

Los montos específicos de cemento a usarse en un trabajo dependerán si existen canales detrás del "casing", que puede comprobarse por un buen "rate" de inyección antes de la operación de cementación forzada. Una guía también puede ser el tipo de cementación forzada a realizarse baja o alta pre-

sión.

Si la formación va a ser hidráulicamente fracturada como en el caso de "squeeze" a alta presión, un volumen tremendo de cemento puede ser bombeado fuera del "casing" y dentro de la fractura vertical fuera del pozo.

En "squeezes" a baja presión, volúmenes de lechada de cemento serán diseñados para no crear una presión hidrostática encima de la presión de fractura de la formación.

**5.4.3.- Presión de "squeeze":** Es la presión a partir de la cual su incremento no significa una mejora en el éxito del trabajo de cementación forzada y solamente posibilita una mayor chance de fracturar la formación.

La selección del final de la presión "squeeze" a ser alcanzada en un trabajo de cementación forzada es muy importante porque ella define cuándo termina el trabajo .

Cuando alta pérdida de fluido de cemento es usada, la presión que se tiene en superficie puede no ser realmente ejercida sobre el cemento en las perforaciones, sino tan sólo sobre el cemento deshidratado dentro del "casing" varios pies encima de las perforaciones.

El tipo de método "squeeze"—ya sea de baja o alta presión—es

un factor a considerar en la determinación de la presión "squeeze" a usar. También lo son las limitaciones de presión del "casing", cabeza del pozo, "drill pipe" o "tubing".

En un "squeeze" a baja presión, la presión "squeeze" final deberá ser 200-300 psi menos que la presión de fractura de la formación. Cuando se tiene planeado reversar, la presión "squeeze" final será 300-500 psi mayor que la presión de circulación reversa.

**5.4.4.- Tiempo de espesamiento y WOC:** El tiempo de espesamiento de una lechada de cemento en una cementación forzada, como en la cementación primaria, está condicionada por la temperatura del pozo y la presión. La presión "squeeze" también afecta la deshidratación de la lechada de cemento.

La temperatura encontrada en un pozo durante una cementación forzada puede ser más alta que la de trabajos primarios debido a que el pozo usualmente no ha sido circulado por fluido suficiente para disminuir la temperatura del fondo del hueco.

Lechadas de cemento pueden ser diseñadas para un apropiado corto tiempo de bombeo si una cavidad superficial es llenada.

En el caso de "hesitation" en un "squeeze" a baja presión, el tiempo de bombeo puede ser tan grande como 4 á 6 horas. Una lechada de cemento obviamente deberá permanecer fluida un tiempo suficiente no sólo para ser colocada adecuadamente, sino también para alcanzar la presión "squeeze" y realizar la circulación reversa, si esto último fuera necesario.

El tiempo de espera para que el cemento se forme está gobernado por el esfuerzo requerido para dicho cemento, de manera que sea lo suficientemente fuerte para resistir los golpes de la perforación, resistir el flujo de los fluidos hueco abajo y aislar un intervalo productivo durante una operación de fracturamiento.

**5.4.5.- Tipo de fluido de "workover" o lodo:** El éxito de un trabajo de cementación forzada depende grandemente de la limpieza y destaponamiento de las perforaciones. Si las perforaciones están taponeadas por costra de filtrado de lodo, se requerirá de excesivas presiones para limpiarlas y forzar a la costra del filtrado que salga.

En lo que sea posible, agua salada o fresca es el fluido de "workover" preferido para ambos trabajos de "squeezes" baja y alta presión. Consideraciones de daño de formación a menudo dictan la composición específica del fluido.

Uno de los mejores caminos para tener las perforaciones limpias y asegurarse un depósito uniforme del cemento es correr una solución ácida débil delante del cemento. El ácido reacciona con las partículas de arcilla y permite a la lechada de cemento una posterior penetración.

## **6.- PROCEDIMIENTO OPERACIONAL DE LA CEMENTACION FORZADA**

**6.1.- Limpiando las perforaciones:** No se debe dejar de enfatizar que la limpieza y destaponamiento de las perforaciones son esenciales para el éxito de un trabajo de cementación forzada.

Si el pozo ha sido perforado con lodo o si las perforaciones han sido puestas en contacto con lodo algunos tapones de lodo pueden permanecer. Aún cuando se limpia con fluido de agua de mar, las perforaciones pueden estar todavía con desechos del baleo.

Las perforaciones pueden también ser limpiadas usando una herramienta de perforación con lavado.

**6.2.- Prueba de inyección:** Una prueba de inyección es usualmente realizada antes de mezclar y bombear el cemento en trabajos de "squeezes". El propósito es asegurarse que las perforaciones están abiertas y listas para aceptar fluido. Determinando la presión en que el "squeeze" tomará lugar y

con el "rate" de inyección se podrá calcular la cantidad de cemento a usarse en el trabajo de "squeeze".

El uso de agua como un fluido de ruptura delante del cemento resulta bueno en un alto porcentaje cuando ha sido usado lodo. Cuando la apertura no es lograda con agua, la limpieza del lodo para obtener inyección deberá hacerse con aditivos o ácido.

**6.3.- Mezclando el cemento:** Debido al pequeño volumen de lechada de cemento usualmente involucrado en trabajos de "squeezes", es muy importante obtener lechadas de cemento con propiedades uniformes.

Es dificultoso, si nó imposible, conseguir una mezcla de unos cuantos a cientos de sacos de cemento a través de la tolva y lograr una lechada de cemento uniforme de comienzo a fin. De aquí que es mejor usar un método de mezcla por tandas. Donde sea posible, recirculando la mezcla se podrán hacer cambios y obtener las propiedades deseadas antes de bombear hueco abajo.

Con los métodos de mezcla por tandas o cuando se usa mezcladores recirculantes, es posible "chequear" la densidad y pérdida de fluido API de la lechada de cemento y compararlo con las características del modelo deseado.

**6.4.- Ubicación del cemento:** La lechada de cemento puede ser colocada sobre las perforaciones, particularmente si secciones grandes de perforados están presentes sin contaminación con lodo. Desde que tapones de cemento no pueden ser usados, la contaminación del cemento con el lodo puede ser minimizada por el uso de espaciadores y lavadores.

Si el agua salada es usado como fluido desplazante, el efecto acelerante de la sal sobre el cemento debe ser considerado y será necesario proteger al cemento con un fluido espaciador.

## **7.- SELECCION DE LA COMPOSICION DE LA LECHADA DE CEMENTO MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA CONDICIONES EN EL NOROESTE Y SELVA PERUANA**

Se deben considerar los siguientes aspectos:

- 7.1.- Tiempo de espesamiento de la lechada de cemento
- 7.2.- Control del filtrado del cemento
- 7.3.- Resistencia a la compresión
- 7.4.- Contracción del cemento después del fraguado
- 7.5.- Permeabilidad del cemento
- 7.6.- Endurecimiento del cemento
- 7.7.- Tiempo de fraguado

De todos ellos, los tres primeros aspectos son fundamentales.

### **7.1.- Tiempo de espesamiento de la lechada de cemento:**

Existen aparatos de laboratorio para medir el tiempo de fluidez de una lechada de cemento sobre las condiciones del pozo.

Estos equipos denominados consistómetros de presión y temperatura ("thickening time tester") simulan la ubicación de un cemento a determinada presión y temperatura, indicando cuánto tiempo la lechada de cemento permanecerá bombeable en las condiciones del "squeeze", aunque no simula la deshidratación de la lechada de cemento, que motiva la resistencia de un cemento al movimiento.

El tiempo de espesamiento se relaciona directamente con las reacciones de hidratación del cemento, a su vez, dependiente de su composición mineralógica, relación agua/cemento, granulometría y aditivos incorporados. El tiempo que se mide es el necesario para que una lechada de cemento alcance una viscosidad aparente de 7 unidades de consistencia o 100 poises en un consistómetro normalizado a las condiciones del "squeeze". Este valor nos indicará el tiempo disponible para colocar el cemento en la posición deseada.

**7.2.- Control del filtrado del cemento:** A menudo es necesario diseñar una lechada de cemento con filtrado del cemento controlado, así como agregar al cemento un retardador de fraguado para conseguir una buena penetración.

La experiencia de campo indica que los tiempos de espesamiento deben estar entre 2 y 4 horas, con una pérdida de fluido entre 60 y 150 cc/30 min. a 1000 psi de presión diferencial siguiendo las normas API.

Contra arcillas o calcáreos (calizas y dolomitas) cuya permeabilidad es nula, no será necesario agregar aditivos para controlar la pérdida de fluido.

Cuando se encuentre ante la posibilidad de alcanzar durante el "squeeze" presiones altas cercanas a la de fractura es recomendable una lechada de cemento de fraguado rápido y alta pérdida de fluido.

La incorporación de agentes dispersantes es una mejora notable en la reducción del filtrado del cemento, permitiendo reducir la relación agua/cemento en la preparación de la mezcla.

El material dispersante mantiene una lechada de cemento a baja viscosidad y baja pérdida de fluido, logrando que el cemento entre en todos los canales y/o espacios vacíos a

través de los cuales se están produciendo fluidos indeseables. Además, por el hecho de ser lechadas de cemento con baja relación WOC, son capaces una vez fraguados de desarrollar mayor resistencia a la compresión que las lechadas de cemento convencionales.

Estos agentes son a base de hidroxietil-celulosa y de gomas naturales denominadas "guar", así como polímeros orgánicos agregados en proporciones que varían de 0.4 á 1.2% por peso.

Con esta proporción de polímeros se producirá una lechada de cemento con un filtrado del cemento entre 60 y 200 cc/30 min á 1000 psi en una malla de 325 mesh (API).

Otros dispersantes como el lignosulfonato de sodio, son a base de sulfato de sodio o carboxietil-celulosa, los cuales pueden ser mezclados con cementos API clase A, B o H, o cementos tipo "pozmix".

**7.3.- Resistencia a la compresión:** En pruebas de laboratorio, la resistencia a la compresión del cemento usado para un "squeeze" es obtenida por "curado" a las condiciones del pozo para cada período específico de tiempo.

Así la costra del filtrado del cemento tendrá una resistencia a la compresión muy alta después de un período de curado, que el que corresponde a un cemento no deshidratado.

Esta propiedad que rige la adherencia del cemento a la formación requiere desarrollarse en un tiempo mínimo, para que el trabajo sea exitoso.

La resistencia a la compresión depende de la relación agua/cemento (WOC) de la mezcla original y de la presión y temperatura.

Cuando el WOC es alto, la resistencia a la compresión disminuye.

A mayor presión y temperatura se incrementa la resistencia a la compresión, hasta presiones de 2058 psi y temperaturas de 194-212°F.

Por encima de 230°F la resistencia a la compresión del cemento después de fraguado tiende a disminuir. A este fenómeno se le conoce como retroregresión de la resistencia a la compresión.

Por experimentos efectuados con diversos tipos de cementos y sus mezclas a temperaturas por encima de 230°F y presión de 3000 psi con distintos períodos de cura tan grandes como 180 días, se encontró que no hay correlación entre la composición química, finura y tiempo de espesamiento del cemento con la pérdida de resistencia a la compresión.

El fenómeno de la retroregresión del cemento adquiere importancia en pozos profundos, donde las condiciones de presión y temperatura son elevadas, en cuyos casos, es práctica común utilizar mezclas de cemento y puzolanas mezcladas con cal, para evitar la retroregresión.

Vinculado con la retroregresión se deberá establecer cuál es la resistencia mínima que tendrá el cemento para aislar fluidos y soportar posteriormente el trabajo de perforación. Señalando que, cuando el cemento alcanza una resistencia a la compresión de 500 psi y a la tracción de 8 psi, no existirán inconvenientes para reiniciar la perforación.

El tiempo de curado varía según la presión y temperatura donde se coloque la lechada de cemento. En general, dependiendo del tipo de mezcla, 8 horas pueden ser suficientes.

**7.4.- Contracción del cemento después del fraguado:** Muchas fallas en aislar zonas con fluidos no deseados pueden deberse a este hecho.

La variación del volumen del cemento está ligado al proceso de hidratación.

La Tabla IV (Ver Anexos) indica el porcentaje de contracción a condiciones de presión y temperatura de formación para diversos WOC.

De dicha Tabla se puede establecer que los cementos presentan una contracción del orden del 3% y que ocurre prácticamente dentro de las 8 horas subsecuentes a su colocación.

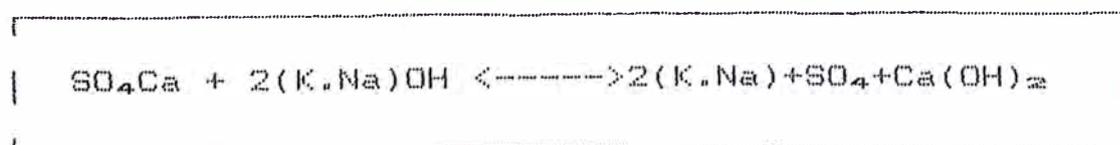
En pruebas realizadas se señaló que contracciones de ese orden no afectan la adherencia del cemento en un pozo.

**7.5.- Permeabilidad del cemento:** Es siempre deseable que la permeabilidad del cemento fraguado sea la menor posible, factor dependiente de las condiciones en que se realiza la deshidratación.

Esta propiedad está ligada a la resistencia a la compresión.

En la Tabla V (Ver Anexos) se tiene una relación entre el tiempo de curado y la permeabilidad del cemento a diferentes temperaturas, estando la permeabilidad en razón inversa de ambas.

**7.6.- Endurecimiento del cemento:** La fase líquida de una lechada de cemento es esencialmente una disolución de sulfatos e hidróxido de calcio, sodio y potasio, que tiende a satisfacer las condiciones de equilibrio requeridos por la ecuación:



Por tanto, cualquier material que desplace la ecuación de uno a otro sentido tendrá efectos sobre el fraguado y el tiempo de espesamiento del cemento.

Dichos materiales pueden actuar como reacciones químicas o ser afectados por reacciones físico-químicas, tales como la absorción.

Los aditivos utilizados para tratar el lodo actúan sobre el cemento como aceleradores o retardadores del fraguado.

En general, los aditivos orgánicos actúan como retardadores y los inorgánicos como aceleradores.

La cantidad de material necesario para alterar las reacciones del fraguado del cemento es pequeña, razón por la cual debe tenerse cuidado con la contaminación de las lechadas de cemento, así como con la remoción del lodo con aditivos perjudiciales depositado en las formaciones permeables, para asegurar un buen contacto entre el cemento y las formaciones tratadas.

Fluidos de completación, lodos, revoques o químicas en el lodo y hasta agua de formación, pueden retardar, diluir o acelerar el proceso de fraguado del cemento.

El WOC tiene también efecto sobre el tiempo de espesamiento

y endurecimiento del cemento.

**7.7.- Tiempo de fraguado:** En la práctica, un período de espera de 4 á 12 horas es suficiente y efectivo una vez alcanzada la presión final del "squeeze", ya que una vez deshidratado el cemento se desarrollará mayor resistencia en un período menor que el que desarrolla un cemento que no ha perdido fluido a presión.

La resistencia a la compresión alcanzada durante este período deberá ser suficiente para soportar la perforación.

## **8.- RESULTADOS DE CAMPO Y EVALUACION ECONOMICA**

CAMPO	:	LOBITOS
POZO	:	LO10-18
FORMACION	:	PARINAS
TIPO TRABAJO	:	AISLAR ZONA DE ENTRADA DE GAS.
TECNICA	:	"PACKER" "SQUEEZE".

### **REPORTE DE LABORATORIO**

Realizado a mezclas de cemento Pacasmayo + aditivos, de acuerdo con el "API SPECIFICATION 10 (SPEC 10) FIFTH EDITION, JULY 1, 1990".

Objetivo.- Realizar pruebas de tiempo de espesamiento, propiedades reológicas, pérdida de filtrado y agua libre.

TABLA I  
COMPOSICION DE LAS MEZCLAS

MEZCLA	COMPOSICION	DENSI- DAD	AGUA REQUER.	VOLUM. MEZCLA
N		#/Gal	Gal/Sxs	Ft <sup>3</sup> /Sx
01	Cemento Pacasmayo+0.9% Halad-9+			
	0.2% CFR-3+0.5 gal/Mgal Dair-II	15.6	5.2	1.18
02	Cemento Pacasmayo+0.9% Halad-9+			
	0.2% CFR-3+0.5 gal/Mgal Dair-II			
	+0.15%HR-7.	15.6	5.2	1.18

TABLA II

TIEMPOS DE ESPESAMIENTO A PRESION Y TEMPERATURA

MEZCLA	PROCESO	PROFUNDIDAD	BHST	BHCT	TIEMPO
N°		Pies	°F	°F	Hrs:Min
01	"squeeze"	4600	126	106	1:38
02	"squeeze"	4600	126	106	3:02

TABLA III  
 PROPIEDADES REOLOGICAS  
 (EN VISCOSIMETRO FANN MODELO 35-A)

MEZCLA N°	LECTURAS EN EL VISCOSIMETRO		
	300 RPM	200 RPM	100 RPM
01	192	150	126
02	184	146	122

TABLA IV  
 PERDIDA DE FILTRADO  
 (A 1000 PSI EN MALLA 325)

MEZCLA N°	TEMPERATURA DE	RESULTADOS
	PRUEBA(°F)	(cc's/30 min)
01	106	96
02	106	100

TABLA V  
AGUA LIBRE

MEZCLA N°	TEMPERATURA DE PRUEBA (°F)	PORCENTAJE DE AGUA
01	80	0.1%
02	80	0.1%

DISTRIBUCION DEL COSTO

<u>SERVICIOS DE TERCEROS</u>		<u>SOLES</u>
"squeeze"		3,224
Tapón EZ-SV		3,567
TOTAL SERVICIOS DE TERCEROS		<b>6,791</b>
<u>MATERIALES Y SUMINISTROS</u>		
"squeeze"		892
EZ-SV y Speed Line		3,087
TOTAL MATERIALES Y SUMINISTROS		<b>3,979</b>
<u>DISTRIBUCION DE FACILIDADES</u>		
Equipo de "workover"      7 días x 1046		<b>7,322</b>
EMBARCACIONES		<b>4,416</b>
De Personal              2 x 974		1,948
Para Frac                ½ x 4936		2,468
TOTAL DISTRIBUCION DE FACILIDADES		<b>11,738</b>
<u>COSTO TOTAL DEL PROYECTO</u>		<b>22,508</b>

AUTORIZACION PARA INVERTIR

**NOMBRE DEL PROYECTO:** AISLAR ZONA DE GAS. POZO L010-18.

**DESCRIPCION:** a) Sacar la instalación gas lift convencional

b) Sentar tapón perforable @4630'

c) Sentar tapón EZ-SV @4510' y efectuar cementación forzada

d) Perforar tapones

e) Bajar instalación gas lift convencional

**JUSTIFICACION TECNICA Y/O ECONOMICA.**- El pozo L010-18 es responsor a la inyección de gas del proyecto Y-L010 Pariñas. Actualmente está cerrado debido a que produce  $\pm 1.2$  MMSCFD. Un registro de temperatura definió la zona productora de gas en el intervalo 4520'-4618'. Por lo que se recomienda aislarla c/cementación forzada para reestablecer la producción de crudo en  $\pm 40$  BOPD.

RUBROS	II TRIMESTRE	TOTAL DESEMBOLSOS
SERVICIOS DE TERCEROS	6,791	6,791
MATERIALES/SUMINISTROS	3,979	3,979
TOTAL COSTOS DIRECTOS	10,770	10,770
COSTOS TRANSFERIDOS	11,738	11,738
TOTAL SOLES	22,508	22,508
US \$ á 0.686 S/.US \$	32,815	32,815

**DESCRIPCION DEL TRABAJO.-** Sírvase encontrar un programa de servicio para aislar la zona de entrada de gas y un API por 32,815 US\$ para el pozo L010-18.

El referido pozo es responsor a la inyección de gas en el proyecto Y-L010 Pariñas. Desde Febrero de 1990 el pozo se mantiene cerrado por producir sólo gas( $\pm 1.2$  MMSCFD). Con el objeto de identificar la zona problema se tomó un registro de temperatura que definió la zona productora de gas en el intervalo 4520'-4618'.

De la interpretación efectuada se desprende la recomendación del aislamiento con una cementación forzada("squeeze") para tratar de recuperar el potencial del pozo, estimado en  $\pm 40$  BOPD.

Un resumen del trabajo sería el siguiente:

- Sacar la instalación convencional
- Sentar un tapón perforable a 4630'
- Realizar una prueba de inyectividad con tubería y "packer" a 4510'
- Sentar un tapón EZ-SV con tubería a 4510'
- Efectuar una cementación forzada
- Perforar tapones
- Bajar una instalación gas lift convencional

## EVALUACION ECONOMICA

- 1.- CAMPO: LOBITOS..
- 2.- FORMACION: PARINAS POZO LO10-18
- 3.- PROYECTO: AISLAMIENTO ZONA DE GAS  
("SQUEEZE")
- 4.- COSTOS DE OPERACION: 15 (M\$/AÑO)
- 5.- PRECIO DEL CRUDO: 12 (NIVEL EMPRESA) Y 22.60 U\$/BL  
(NIVEL PAIS)
- 6.- AÑOS VIDA DEL PROYECTO: 10
- 7.- COSTO DE CAPITAL: 20%
- 8.- TASA DE IMPUESTOS: 35%
- 9.- INVERSION TANGIBLE: 0
- 10.- INVERSION INTANGIBLE: 33 M\$
- 11.- PRONOSTICO DE PRODUCCION

AÑOS	BOPD
1	31
2	27
3	24
4	22
5	21
6	19
7	18
8	18
9	17
10	16

NOTA: -El pronóstico de producción se obtuvo de la curva de

declinación de la formación Pariñas del pozo LO10-18 para diez años restantes.

No se consideró precio del gas por MSCF.

La producción inicial del pozo LO10-18 fué de 120 BOPD hace 6 años.

Los resultados de la Evaluación Económica se detallan a continuación:

PRECIO DEL CRUDO	<u>NIVEL EMPRESA</u>	<u>NIVEL PAIS</u>
	<u>12 U\$/BL</u>	<u>22.60 US\$/BL</u>
RESERVAS, MSTB	78	78
V.A.N. (TASA DESCUENTO 20%)	244	517
T.I.R., %	>100	>100
TIEMPO DE PAGO, AÑOS	0.37 (4½ MESES)	0.2 (2½ MESES)
RELACION G/I, \$/\$	8.11	17.16

-SI LAS RESERVAS SON ALCANZADAS EL PRECIO MINIMO REQUERIDO PARA PAGAR EL PROYECTO SERIA 2.5 US\$/BL.

-LOS ANALISIS DE FLUJO DE CAJA SON PRESENTADOS EN LOS ANEXOS I, II Y III. (Ver Anexos).

**CONCLUSION: EL PROYECTO ES MUY RENTABLE.**

PROGRAMA DE SERVICIO POZO L010-18

- 1.- Mover una unidad de servicio al pozo L010-18
- 2.- Desfogar y controlarlo con crudo o diesel. De ser necesario usar agua tratada
- 3.- Remover árbol e instalar control Cameron S/QRC 7 1/16"
- 4.- Descargar "packer" y sacar la instalación presente
- 5.- Bajar tubería 2 7/8" con rima hasta 5025' RKB.Sacar
- 6.- Mover unidad de registros eléctricos al pozo L010-18
- 7.- Instalar lubricador.Bajar chequeador hasta 4700' Sacar
- 8.- Bajar con cable tapón perforable de 5½" y sentar a 4630' Bajar 1 saco arena 20/40(collares:4681.5', 4641.5', 4602', 4562')
- 9.- Mover unidad de registros eléctricos a otra locación
- 10.- Bajar tubería con "packer" y punta libre hasta 4620 pies, chequear tapón presurizando con agua tratada hasta 1000 psi. Descargar,Subir y sentar "packer" @4510' medidos
- 11.- Realizar prueba de inyektividad con agua tratada.Tener los forros abiertos al campo
- 12.- De existir comunicación de la zona a aislar, con el intervalo superior (anular),se utilizará el aditivo para reducir pérdida de filtrado a HALAD-9 en una concentración de 0.9% en la mezcla de cemento. De no existir comunicación continuar con el paso 13
- 13.- Sacar la tubería con "packer"
- 14.- Bajar tubería de 2 7/8"con tapón EX-SV y sentarlo

@4510' medidos

- 15.- Efectuar trabajo de cementación forzada de acuerdo al Anexo #2
  - 16.- Después de 36 horas bajar la tubería con broca, moler tapón EZ-SV y el cemento hasta  $\pm 4625'$  medidos (no llegar al 1er. tapón)
  - 17.- Efectuar prueba de inyektividad, para lo cual se bajará tubería de 2 7/8" con niple de asiento y "packer" @ 4510' (ver Anexo #3)
  - 18.- Bajar "standing valve" y probar la tubería con 1000 psi, usando agua tratada. Si mantiene la presión por 10 minutos; desfogar y recuperar standing valve; de lo contrario corregir fuga
  - 19.- Presurizar a través de tubos usando agua tratada. Comenzar con 200 psi parar 5 minutos, incrementar 100 psi, repetir la anterior hasta llegar a 500 psi, al final mantenerlo por 20 minutos. Evaluar. Si el resultado es negativo repetir la operación regresando al paso 14
- NOTA: Usar un registrador de presión con carta (Barton), conectado a la cabeza del pozo (3er. nivel), paralelamente instalar un manómetro de 1000 psi
- 20.- Sacar la tubería y "packer"
  - 21.- Bajar tubería con broca y perforar el tapón e ir hasta 5025' medidos. Sacar
  - 22.- Bajar una instalación "gas lift" de acuerdo al Anexo #4
  - 23.- Suabear hasta 2400' medidos

- 24.- Arrancar el pozo y ponerlo en prueba
- 25.- Tomar "record" de presión y evaluar
- 26.- Mover la unidad de servicio a otra locación

NOTA:

- 1) Agua tratada=Agua de mar+ $\frac{1 \text{ gal Fracflo-CS}}{M \text{ gal}}$  + $\frac{1 \text{ gal CLA}}{M \text{ gal}}$
- 2) Durante la evaluación del pozo tomar "record" de entrada de gas de alta y salida de gas producido así como la determinación del porcentaje de agua.

PROGRAMA DE CEMENTACION FORZADA POZO L010-18

- 1.- Probar la tubería de 2 7/8" con 3000 psi, sin correr camiseta. Descargar
- 2.- Sacar el "stinger" del EZ-SV, bombear 10 bls de ácido y desplazar con 10 bls de agua tratada (forros abiertos), luego introducir el "stinger" en el EZ-SV y continuar desplazando con ±16 bls de agua tratada para efectuar la prueba de inyektividad. Con esta prueba determinar el "rate" de admisión y la cantidad de sacos de cemento a ser usados.
- 3.- Sacar la tubería con "stinger" ±15 pies del EZ-SV
- 4.- Bombear mezcla de cemento, desplazar con agua tratada cuando la cabeza de cemento esté ±5 bls de la punta del "stinger", introducir toda la sarta en el EZ-SV y continuar desplazando. Realizar la prueba de "hesitación" hasta conseguir presión de cierre
- 5.- Levantar tubería y "stinger" hasta 4200' y realizar la operación de reversa con ±1000 bls de agua tratada de forros a tubos
- 6.- Sacar toda la tubería y "stinger". Dejar el pozo abierto
- 7.- Retornar el paso #16 del Anexo IA.

NOTA: A) Acido a bombear: 10 bls.

HCL(10%) +  $\frac{1 \text{ gal}}{M \text{ gal}}$  Fracflo-CS

C) Cemento a usar: ± 70 sxs.

cemento neto + 0.9% Halad-9 +  $\frac{0.5 \text{ gal}}{M \text{ gal}}$  D-AIR-2

REPORTE DE "SQUEEZE" POZO L010-18

01-07-91

- 08:20 a.m. Se prueba línea de superficie con 1500 psi
- 08:30 a.m. Se circula de tubos a forros
- 08:35 a.m. Se prueba "tubing" 2 7/8" con 900 psi
- 09:00 a.m. Se bombea 10 bls. de ácido
- Se desplaza con 10 bls de agua tratada ("rate"  
07 bls/min.)
- Bombea en segunda y mínima
- Se introduce "stinger" en el tapón EZ
- Se continúa desplazando con 16 bls de agua  
tratada
- P=400 psi (llega el ácido a la formación)
- P=510 psi (presión anterior a llegada de  
ácido)
- 10:00 a.m. Se empieza a preparar mezcla de cemento (pre-  
viamente se saca "stinger")
- 40 sxs-8.4 bls de cemento
- 10:15 a.m. Se bombea cemento a un "rate" bajo (1 bls/min)
- con 50 psi
- Se desplaza con 10 bls de agua tratada
- Se procede a meter "stinger" en el tapón EZ y  
se continúa desplazando con 10.6 bls de agua  
tratada ("rate" 1 bl/min. P=50 psi)
- 10:40 a.m. Se procede a realizar la hesitación con 1 bl  
introduciendo en la formación (cemento), la

presión sube de 50 psi a 100 psi y quedó en el "tubing" 4 ½ bls de cemento

10:50 a.m. Se desplaza 1 bl de cemento a la formación, no arma presión

11:10 a.m. Se desplaza 1 bl de cemento, presión sube a 200 psi inicialmente luego sube a 350 psi (presión de cierre). El desplazamiento se realiza lento

11:55 a.m. Se saca "stinger" del tapón EZ y se comenzó hacer reversa de forros a tubos. En el "tubing" hay 2 ½ bls de cemento remanente

Se usó 100 bls de agua tratada

01:15 p.m. Termina el "squeeze".

## 9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los conceptos tratados en el presente trabajo muestran la importancia de la cementación forzada en la industria del petróleo.

Existe variedad de literatura técnica especializada en esta materia, pero subsisten dudas y discusiones en relación a la forma, método y técnica para efectuar una cementación forzada en un pozo. Es por esto, que un trabajo de "squeeze" requiere siempre de un planeamiento minucioso y apropiado.

Las condiciones del pozo deben ser estudiadas y el objetivo del "squeeze" debe ser rigurosamente establecido, ya que este tipo de cementación puede complicarse, tornándose en ocasiones en operaciones de alto costo.

Por razones de seguridad y éxito del trabajo no se debe escatimar en el uso de herramientas y materiales más apropiados, ya que de no hacerlo, podría llegarse hasta duplicar el costo total por un trabajo adicional que habría que realizar si el anterior no fuera exitoso.

Es necesario recordar que un "squeeze" eficaz significa:

**a) En lo que se refiere a técnica:**

El uso de la técnica apropiada, considerando la profundidad a la que se realiza la operación, ya sea reparando fallas en la cementación primaria, "squeezándose" perforaciones por abandonar, o para obturar una zona fracturada; que como se ha explicado cada una de las cuales, requiere de un técnica especial.

Deberá ser muy cuidadoso en verificar y probar el "tubing" o "drill pipe" con las presiones máximas de tratamiento para evitar fugas de presión, que podrían inclusive ocasionar hasta la pérdida del pozo.

**b) En lo que se refiere a herramientas:**

Seleccionar las herramientas apropiadas en la superficie. Tener presente que tanto en el uso de "packers" perforables, como en los recuperables, existen ventajas y desventajas.

Cuando no se tiene experiencia en el área o no se tenga confianza en el tiempo de espesamiento de la mezcla es recomendable el uso de "packer" perforable.

La técnica más eficiente en lo que a cementación forzada se refiere es la de baja presión, por los excelentes resultados obtenidos, derivados del control de la pérdida de fluido de la lechada de cemento.

Al utilizar esta técnica, la quiebra de la formación es prevenida y la presión final es obtenida por "hesitación" o bombeo intermitente.

La lechada de cemento no penetra totalmente en la formación, se limita a llenar los espacios vacíos o con fluidos en la formación hasta que los elementos sólidos la obturen.

Ensayos y pruebas de laboratorio demuestran que para que una lechada de cemento pueda fluir como tal a través de un medio poroso permeable, la permeabilidad de la formación debe ser  $\geq 100$  darcys.

La tecnología señala que todas las perforaciones no siempre están abiertas y que no aceptarán fluidos a menos que se realice un esfuerzo considerable para abrirlas, con el riesgo de fracturar la formación.

Generalmente no se debe usar lodo para la prueba de inyektividad, especialmente en zonas donde existen canales de flujo restringidos; es aconsejable usar agua tratada o solución ácida débil.

Se deberán realizar pruebas a la formación, de manera que se obtenga una solución óptima que limpie efectivamente las zonas que estarán en contacto con el cemento.

La cantidad de material necesario (aditivos) para alterar las reacciones de frague del cemento, es relativamente pequeña, debiendo ser por ésto impedida la contaminación de las lechadas de cemento, así como lograr la remoción suficiente del lodo en la zona a ser tratada.

Estudios ligados al tiempo mínimo de frague que permita iniciar la operación de perforación después de una cementación, establecidos en pruebas de laboratorio, señalan que no existe ningún inconveniente cuando el cemento alcanza una resistencia de 8 psi a la tracción y 500 psi a la compresión.

En la práctica, un período de espera de 4 á 12 horas (según la mezcla utilizada), generalmente es suficiente y efectiva para alcanzar una resistencia a la compresión capaz de soportar la perforación.

Ya que realizar un trabajo de cementación forzada representa un incremento de inversión en la economía de un pozo, se deberá tener especial supervisión en los diseños y operaciones de cementaciones primarias, para poder evitar problemas de falta de cemento, canalizaciones y/o calidad del mismo.

## 10.- BIBLIOGRAFIA

- Millikan, C.F. : "History of Petroleum Engineering",  
American Petroleum Institute
  
- Howard, G.C. and Fast, R. : "Squeeze Cementing Operations"  
AIME Trans
  
- Montgomery, P.C. and Slagle, K.A. : "Problems Relatet To  
Squeeze Cementing". Journal of Petroleum  
Technology
  
- Beach, H.J. ; O'Brien, T.B.; and Goins, W.C., Jr : "Formation  
Cement Squeezes By Using Low-water-loss  
Cements". The Oil and Gas Journal
  
- Boice, Dave and Diller, John : "A Better Way To Squeeze  
Fractured Carbonates".
  
- Hodges, J.W. "Squeeze Cementing Methods And Materials"  
  
"Recomended Practice For Testing Oil-well  
Cements And Cements Additives"
  
- Shell, F.J., and Wynne, R.A.: "Applications Of Low-water-  
loss Cements Slurries"

- Dumbauld, G.K., Perry, D., Brinkley, G.W. and Brooks,  
F.A., Jr.: "An Accelerated Squeeze Cementing  
Technique"
  
- Beach, H.J. : "Controlled Filtration Rate Improves Cement  
Squeezing"
  
- Stout, C.M. and Wahl, W.W.: "A New Organic Fluid-loss  
Control Additive For Oil-well Cement"
  
- Shyrock, S.H. Slagle K.A. : "Problemas de Cementaciones a  
Presión". Halliburton Services.

12.- ANEXOST A B L A I

COMPONENTES	CEMENTO A	CEMENTO B
	Fábrica S	Fábrica R
Oxido de calcio (OCa)	63.27%	62.77%
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	22.58%	21.5%
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.51%	5.35%
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.47%	2.51%
Magnesio (OMg)	1.06%	2.28%
Anhidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	2.56%	1.86%
Alcali (K <sub>2</sub> )	0.20%	0.27%
(LOI)	1.28%	0.96%
(TiO <sub>2</sub> )	**	0.26%

Estos componentes durante el proceso de clinquerización, fueron compuestos complejos en diferentes proporciones tales como en la Tabla II.

T A B L A I I

CONSTITUYENTES MINERALOGICOS	CEMENTO COMUN	CEMENTO RETARDADO
Silicato Tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )	34.30	37.81
Silicato Dicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )	35.68	36.22
Aluminato Tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )	12.36	0.00
Ferro Aluminato Tetracálcico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - 4\text{CaO}$ )	11.18	21.89

T A B L A III

ELEMENTOS ANHIDROS	ELEMENTOS HIDRATADOS	
	temperatura y presión normal	temperatura y presión elevada
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ y $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$15\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 1 á 1.5 $\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	$2\text{Ca} \cdot \text{SiO}_2$ 1 á 2.5 $\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{HO})_2$ (de $90^\circ$ á $180^\circ\text{C}$ )
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 3$ $1\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4\text{Ca} \cdot 12$ $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4\text{Ca}$ $60-100^\circ\text{C}$  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} +$ $\text{SO}_4\text{Ca}$ (hasta $140^\circ\text{C}$ )
Alcalis (vidrios)	$\text{KOH} + \text{NaOH} +$ aluminatos silicatos cálcicos	
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ o $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO}$ y $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 3$ $1\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - \text{Ca}$ $(\text{OH})_2 + \text{Fe}(\text{OH})_3$ cer- ca de $100^\circ\text{C}$

T A B L A I VPORCENTAJE DE CONTRACCION

CEMENTO	RELACION AGUA/CEMENTO					
	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
Común	* *	1.1	1.8	2.6	3.0	4.5
Retardado	* *	0.8	1.2	2.9	3.8	4.6

T A B L A V

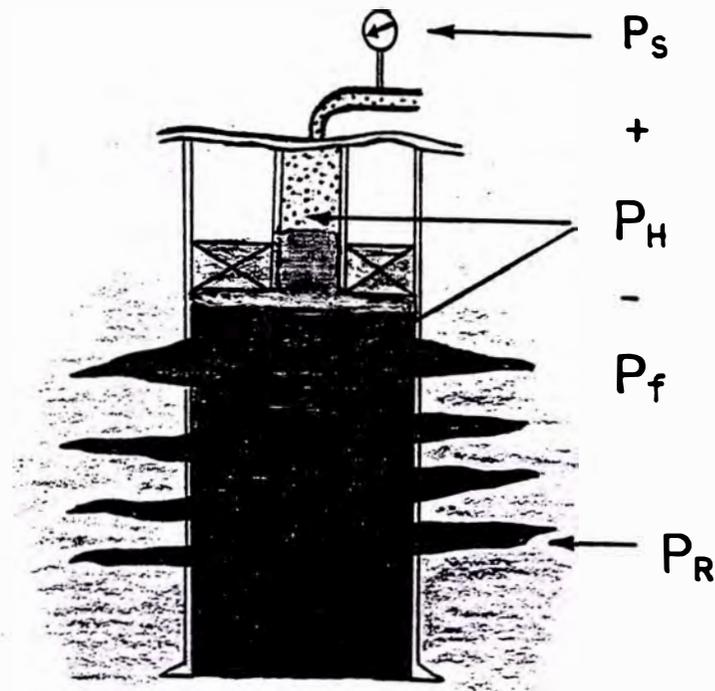
Tiempo de curado horas	Permeabilidad en milidarcys a temperatura de		
	50°C	80°C	120°C
5	1.51	0.25	0.20
8	1.05	0.20	0.23
12	0.60	0.22	0.20
16	0.40	0.19	0.16
24	0.11	0.08	0.17
32	0.07	0.10	0.12
48	0.02	0.11	0.13
120	0.01	0.10	0.14

T A B L A V I  
REQUISITOS QUIMICOS

TIPO	COMUN		A	B	C	D.E.F.	G
	Oxido de magnesio	max%	5.00	*	5.00	* * *	*
	Anhidrido sulfúrico	"	3.00	*	4.00	* * *	*
	Pérdida por calcinación	"	3.00	*	3.00	* * *	*
	Residuo insoluble	"	0.75	*	0.75	* * *	*
	Aluminato tricálcico	"	*	*	15.00	* * *	*
TIPO MODERADAMENTE							
RESISTENTE A SULFATOS							
	Oxido de magnesio	max%	*	5.00	5.00	5.00	5.00
	Anhidrido sulfúrico	"	*	2.50	3.00	2.50	2.50
	Pérdida por calcinación	"	*	3.00	3.00	3.00	3.00
	Residuo insoluble	"	*	0.75	0.75	0.75	0.75
	Silicato tricálcico	"	*	*	*	* *	58.00
		min%	*	*	*	* *	48.00
	Aluminato tricálcico	max%	*	8.00	8.00	8.00	8.00
	Alcali total como Na <sub>2</sub> O	"	*	*	*	* *	0.60
TIPO ALTAMENTE							
RESISTENTE A SULFATOS							
	Oxido de magnesio	max%	*	5.00	5.00	5.00	5.00
	Anhidrido sulfúrico	"	*	2.50	3.00	2.50	2.50
	Pérdida por calcinación	"	*	3.00	3.00	3.00	3.00
	Residuo insoluble	"	*	0.75	0.75	0.75	0.75
	Silicato tricálcico	"	*	*	*	* *	58.00
		min%	*	*	*	* *	48.00
	Aluminato tricálcico	max%	*	3.00	3.00	3.00	3.00
	Alcali total como Na <sub>2</sub> O	"	*	*	*	* *	0.60
	Alumino-Ferrita-Tetra-cálcico más el doble de alum.tricálcico	"	*	24.00	24.00	24.00	24.00

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

### CEMENTACION FORZADA A BAJA PRESION



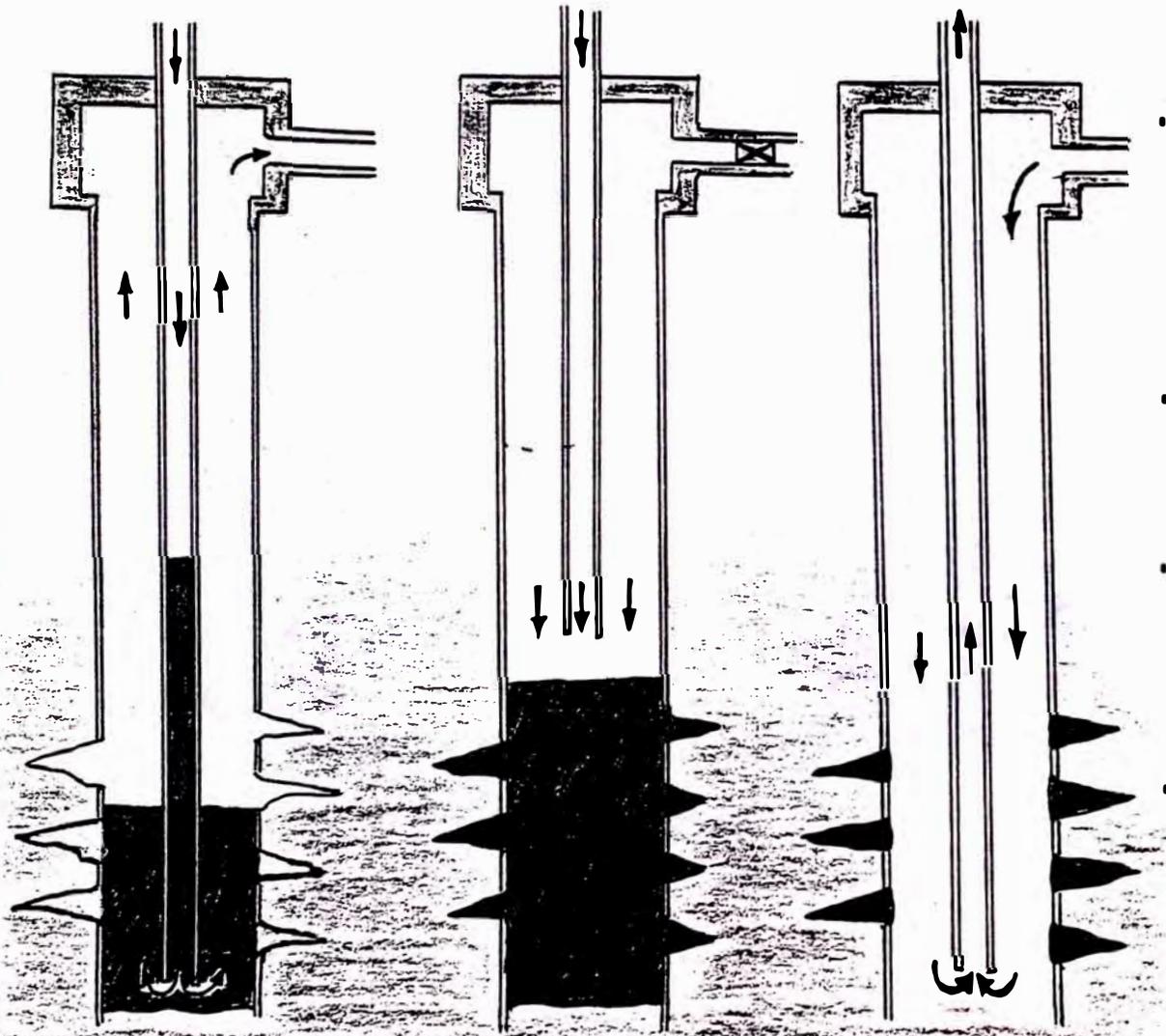
- EL CEMENTO ES DIRIGIDO A TRAVES DE LOS INTERVALOS PERFORADOS APLICANDO SUFICIENTE PRESION PARA FORMAR UNA COSTRA DE FILTRADO DE CEMENTO DESHIDRATADO.
- LA PRESION DE TRABAJO ESTA ENTRE 300 A 1000 PSI DEBAJO DE LA PRESION DE FRACTURA.
- SE USA CEMENTO CON BAJA PERDIDA DE FLUIDO (DE 50 a 100 cc/30 min), PARA REDUCIR EL "RATE" DE DESHIDRATACION.

$$P_s + P_H - P_f < P_R$$

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

...

### CEMENTACION FORZADA "BRADEN HEAD"



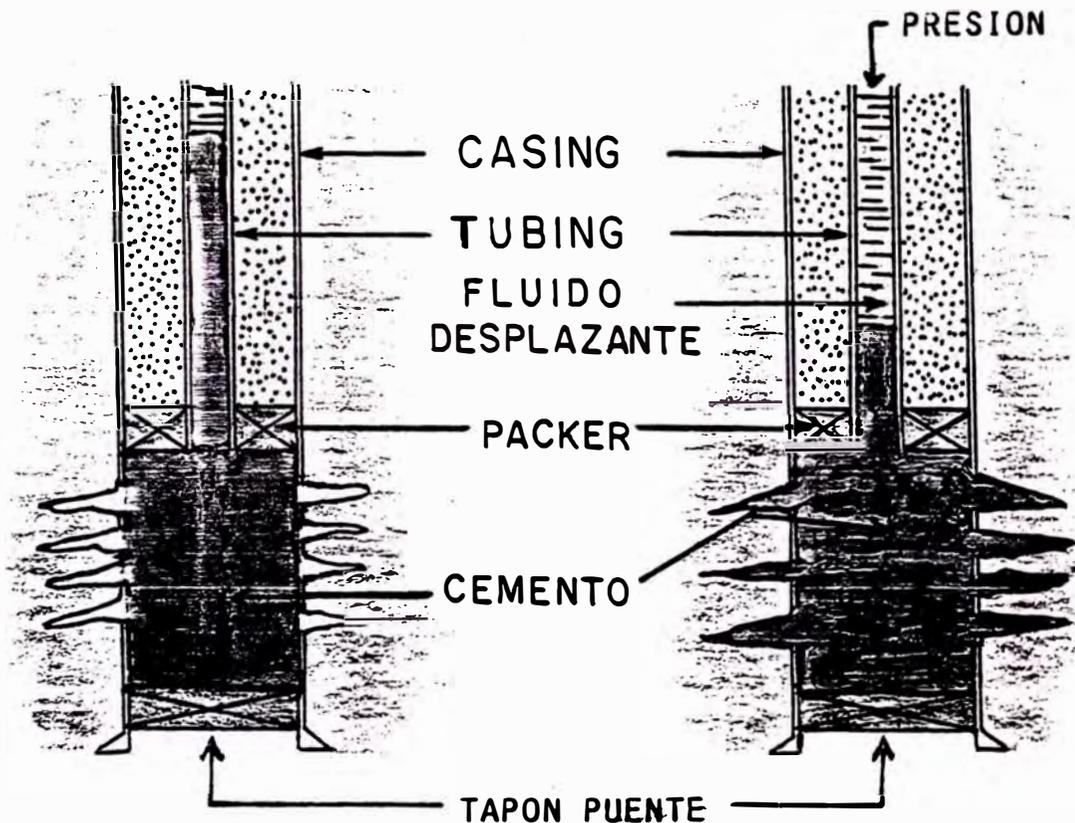
- SE EFECTUA A TRAVES DEL "TUBING" SIN EL USO DE "PACKER" EN POZOS SUPERFICIALES.
- DESPUES DE HACER LA PRUEBA DE ADMISION SE DESPLAZA EL CEMENTO A LA ZONA DE INTERES, EL "TUBING" ES LEVANTADO ENCIMA DEL CEMENTO Y PERFORACIONES.
- EL BOP (PREVENTOR DE REVENTONES) SE CIERRA PARA EVITAR EL FLUJO EN EL ANILLO.
- SE APLICA PRESION POR EL "TUBING" (BAJA PRESION) FORZANDO A QUE LA LECHADA DE CEMENTO SE DESHIDRATE CONTRA LA FORMACION.
- EL EXCESO DE CEMENTO EN LA SARTA DE TRABAJO Y "CASING" PUEDE SER SACADO POR CIRCULACION REVERSA O POR PERFORACION POSTERIOR.

...

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

...

### CEMENTACION FORZADA CON "PACKER"



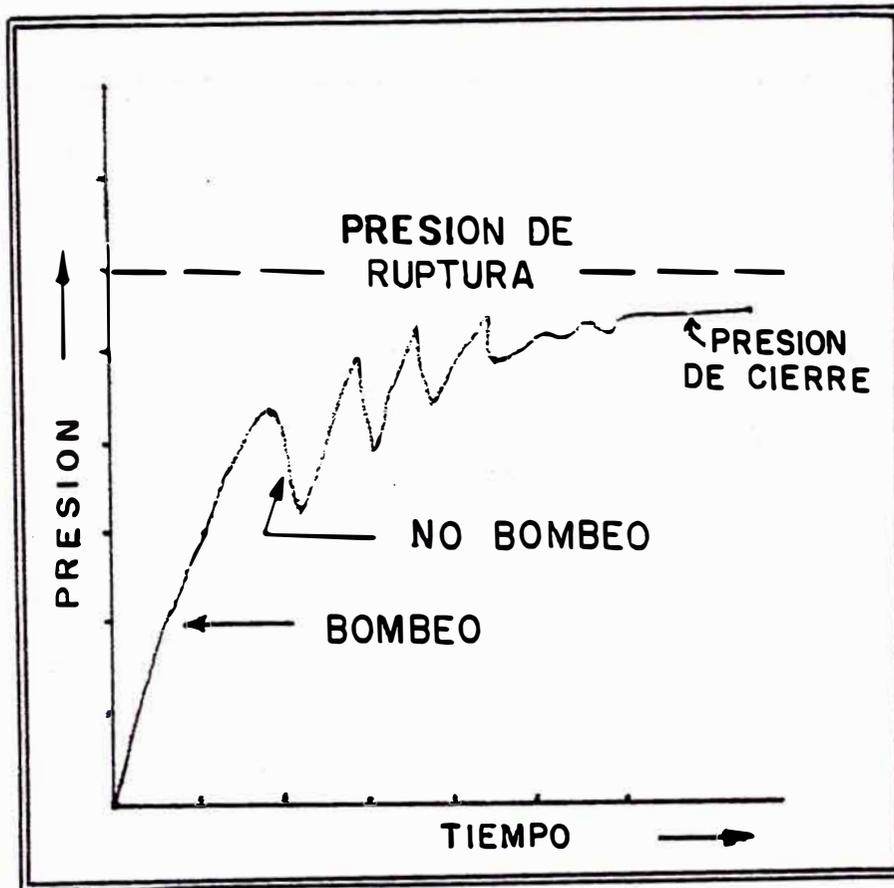
- SE BAJA "TUBING" CON "PACKER" (RECUPERABLE O NO RECUPERABLE) A UNA PROFUNDIDAD CERCANA A LA ZONA A SER CEMENTADA (DE 30' a 60' ENCIMA DE LAS PERFORACIONES).
- LA SECCION DEBAJO DE LA ZONA A SER TRATADA ES AISLADA CON UN TAPON PUENTE.
- PRUEBA DE INYECTIVIDAD .
- MEZCLAR Y DESPLAZAR EL CEMENTO.
- SENTAR EL "PACKER" Y APLICAR PRESION (PRESION CEMENTACION FORZADA  $\leq$  PRESION FRACTURA FORMACION).
- EXCESO DE CEMENTO PUEDE SER SACADO POR REVERSA.

...

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

...

### CEMENTACION FORZADA CON "HESITATION"



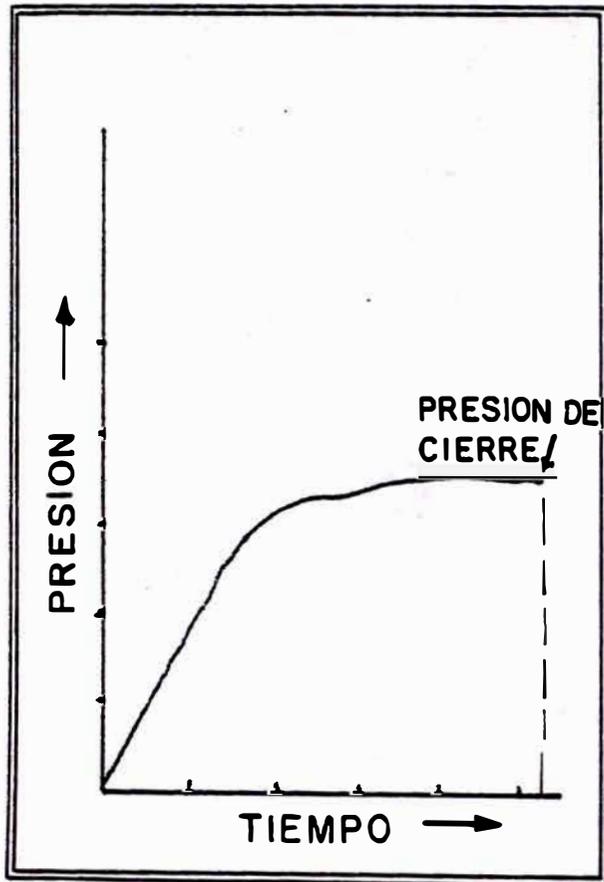
- EL METODO DE "HESITATION" IMPLICA COLOCAR EL CEMENTO EN UNA SOLA ETAPA, PERO DIVIDIDA EN ETAPAS DE BOMBEO/NO BOMBEO (CON PARADAS DE 1 A 5 MINUTOS), EL CUAL PERMITE QUE EL CEMENTO CUYA PERDIDA DE FLUIDO ES CONTROLADO OCUPE LOS ESPACIOS VACIOS EN LOS PERFORADOS.
- ESTA TECNICA PUEDE USARSE YA SEA EN APLICACIONES CON ALTA O BAJA PRESION.
- EL BOMBEO SE CONTINUA HASTA QUE LA PRESION FINAL DE LA CEMENTACION FORZADA ES LOGRADA.

...

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

...

### CEMENTACION FORZADA CORRIDA



. A DIFERENCIA DE LA TECNICA DE CEMENTACION FORZADA CON "HESITATION", ESTA TECNICA ES LOGRADA POR INYECCION CONTINUA DE LA LECHADA DE CEMENTO HASTA QUE LA PRESION FINAL DE LA CEMENTACION FORZADA ES LOGRADA.

. ESTA TECNICA PUEDE SER USADA YA SEA EN APLICACIONES CON ALTA O BAJA PRESION.

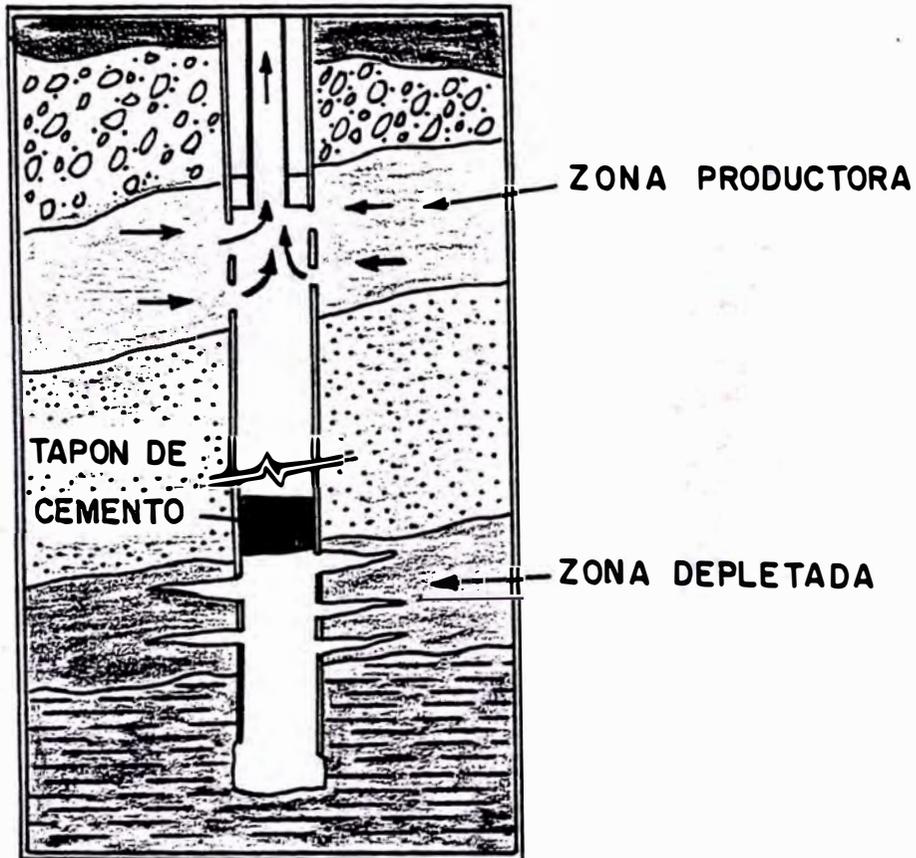
. ES APLICADA EN PROFUNDIDADES SOMERAS.

...

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

...

AISLAMIENTO DE UNA ZONA DEPLETADA

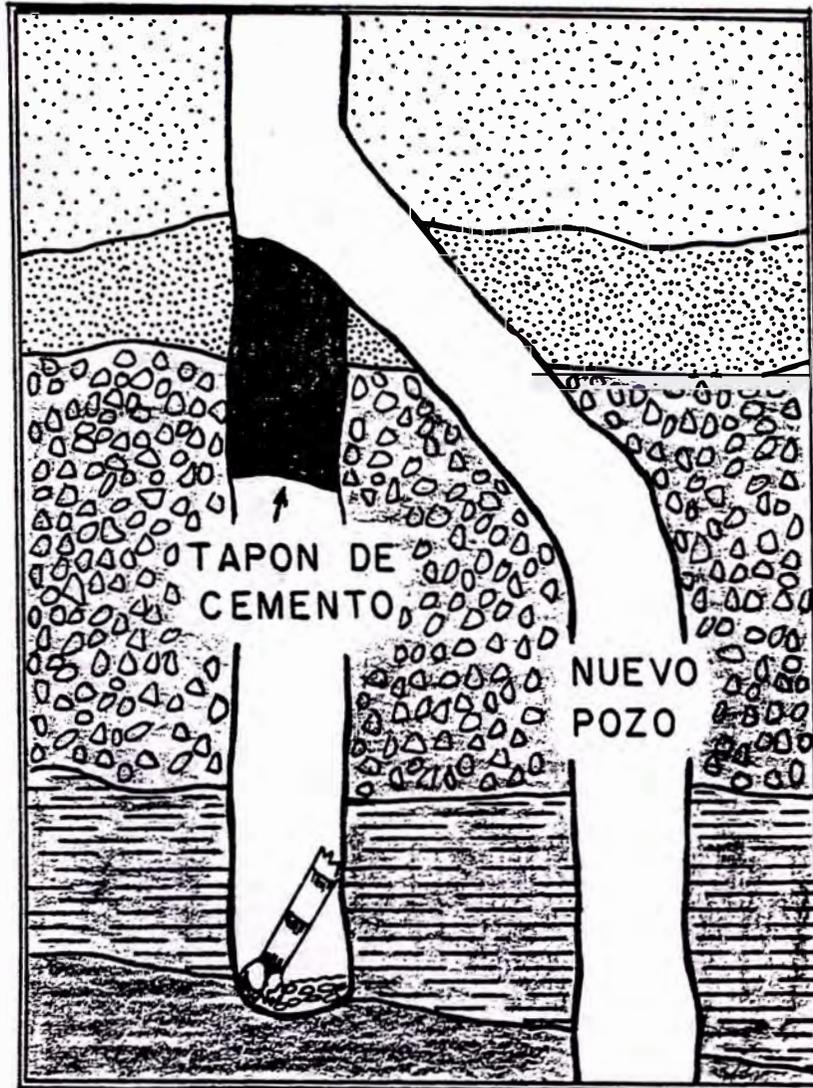


. PARA EVITAR LA MIGRACION DE LOS FLUIDOS DE LA ZONA PRODUCTIVA HACIA LA ZONA DEPLETADA, SE COLOCA UN TAPON DE CEMENTO ENCIMA DE LA ZONA DEPLETADA.

...

## TECNICA DE UNA CEMENTACION FORZADA

... DESVIO LATERAL O PERFORACION DIRECCIONAL



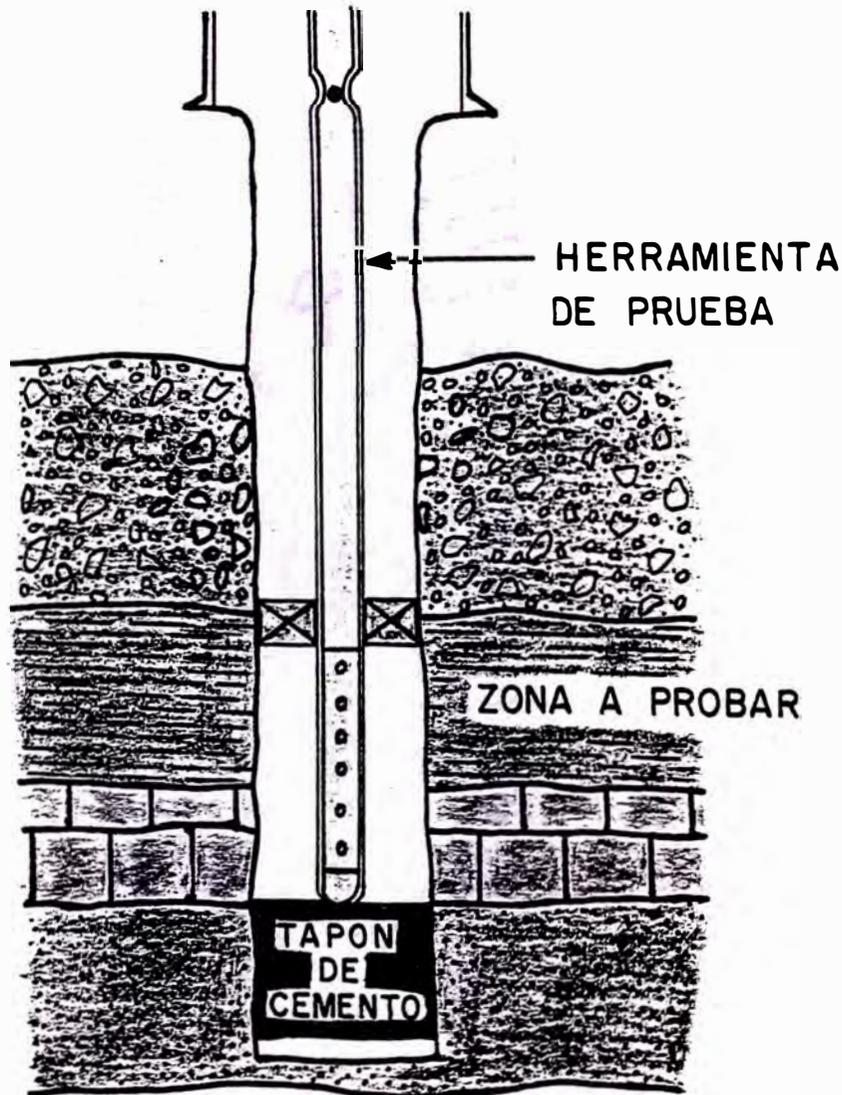
PARA DESVIAR LATERALMENTE LA PERFORACION ALREDEDOR DE UNA HERRAMIENTA PERDIDA DEFINITIVAMENTE COLOCANDO UN TAPON DE CEMENTO A UNA PROFUNDIDAD ESPECIFICA PARA AYUDAR A SOPORTAR LA COLUMNA.

...

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

...

### PRUEBAS DE FORMACION



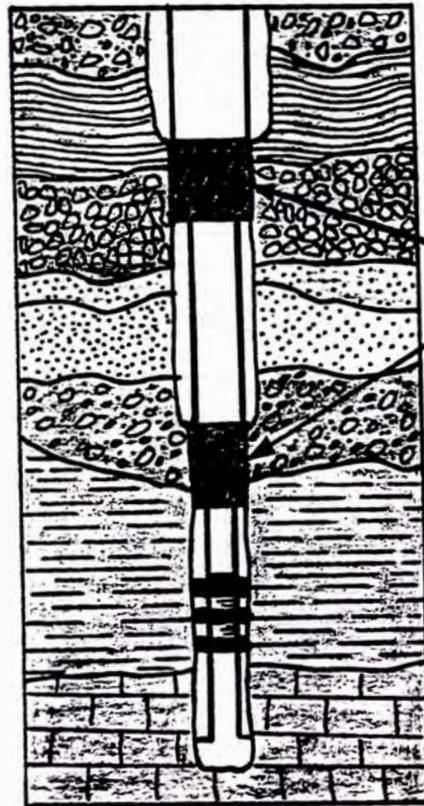
. UN TAPON DE CEMENTO INMEDIATAMENTE DEBAJO DE LA ZONA A SER PROBADA PARA SOPORTAR EL PESO DE LA COLUMNA, ALGUNAS VECES ES NECESARIO POR SER MAS ECONOMICO Y MAS CONVENIENTE.

...

## TECNICAS DE UNA CEMENTACION FORZADA

...

ABANDONO



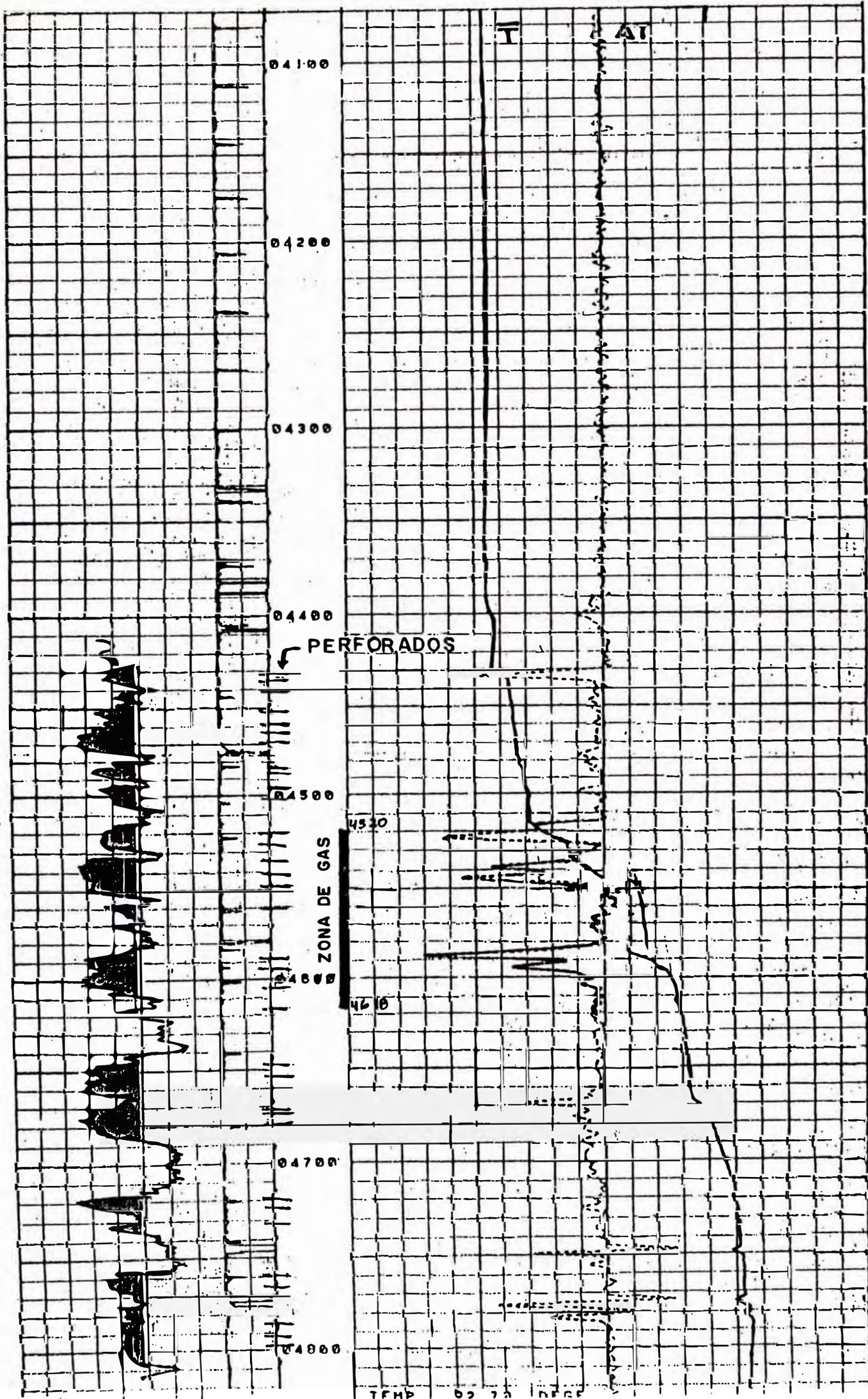
TAPON DE  
CEMENTO

- . PARA SELLAR FORMACIONES NO PRODUCTIVAS O FORMACIONES DEPLETADAS.
- . PARA ABANDONAR TEMPORAL O DEFINITIVAMENTE UN POZO.

...

ISTRO DE  
EATURA

I. PARIÑAS  
010-18



CAMPO LOBITOS

FORMACION: PARINAS

POZO: LO10-10

AISLAMIENTO DE ZONA DE GAS (SQUEEZE)

MILES DE US. DOLARES

AÑO	BOPD	GOR	OIL (NET) MB/A.	GAS DEL'D MBCF	INGRESOS			OPER. COSTS	DEPRE- CIACION	AMORTI- ZACION	TAXABLE INCOME	INVERSION		FLUJO DE CAJA		
					OIL	GAS	TOTAL					TANG.	INTANG	IMPUESTOS	CURRENT	C.DSCTD
1	31	0	11.3	0.0	136	0	136	15	0	33	88	0	33	31	57	52
2	27	0	9.9	0.0	118	0	118	15	0	0	103	0	0	36	67	103
3	24	0	8.8	0.0	105	0	105	15	0	0	90	0	0	32	59	140
4	22	0	8.0	0.0	96	0	96	15	0	0	81	0	0	28	53	168
5	21	0	7.7	0.0	92	0	92	15	0	0	77	0	0	27	50	190
6	19	0	6.9	0.0	83	0	83	15	0	0	68	0	0	24	44	207
7	18	0	6.6	0.0	79	0	79	15	0	0	64	0	0	22	41	219
8	18	0	6.6	0.0	79	0	79	15	0	0	64	0	0	22	41	230
9	17	0	6.2	0.0	74	0	74	15	0	0	59	0	0	21	39	238
10	16	0	5.8	0.0	70	0	70	15	0	0	55	0	0	19	36	244
TOTAL		0	77.7	0.0	933	0	933	150	0	33	750	0	33	262	487	

## PARAMETROS BASICOS

RESERVAS.MSTB	78
GAS ENTREGADO.XPRODUCIDO	0
INVERSION TOTAL.M\$	33
TANGIBLE.M\$	0
INTANGIBLE.M\$	33
PRECIO DEL PETROLEO.\$/STB	12.00
PRECIO DEL GAS.\$/MSCF ENTREGADO	0.00

## EVALUACION ECONOMICA

VALOR PRESENTE A 20.0 % M\$	244
ERROR.%	SOBRE 100
TIEMPO DE PAGO.ANOS	0.37
G/I DESCONTADO.\$/\$	0.11

CAMPO LOBITOS

FORMACION: PARINAS

POZO: L010-18

## AISLAMIENTO DE ZONA DE GAS (SQUEEZE)

MILES DE US. DOLARES

AÑO	BOPD	GOR	OIL (NET) MB/A.	GAS DEL'D MCF	INGRESOS			OPER. COSTS	DEPRE- CIACION	AMORTI- ZACION	INVERSION		FLOJO DE CAJA				
					OIL	GAS	TOTAL				TAXABLE INCOME	TANG. INYANG	INTANG.	IMPUESTOS	CURRENT	C.DSCTD	
1	31	0	11.3	0.0	256	0	256	15	0	33	200	0	33	73	135	123	
2	27	0	9.9	0.0	223	0	223	15	0	0	200	0	0	73	135	226	
3	24	0	8.8	0.0	198	0	198	15	0	0	183	0	0	64	119	301	
4	22	0	8.0	0.0	181	0	181	15	0	0	166	0	0	58	108	359	
5	21	0	7.7	0.0	173	0	173	15	0	0	158	0	0	55	103	404	
6	19	0	6.9	0.0	157	0	157	15	0	0	142	0	0	50	92	438	
7	18	0	6.6	0.0	148	0	148	15	0	0	133	0	0	47	87	464	
8	18	0	6.6	0.0	148	0	148	15	0	0	133	0	0	47	87	486	
9	17	0	6.2	0.0	140	0	140	15	0	0	125	0	0	44	81	504	
10	16	0	5.8	0.0	132	0	132	15	0	0	117	0	0	41	76	517	
TOTAL			0	77.7	0.0	1757	0	1757	150	0	33	1574	0	33	551	1023	

## PARAMETROS BASICOS

RESERVAS.MSTB	78
GAS ENTREGADO.%PRODUCIDO	0
INVERSION TOTAL.M\$	33
TANGIBLE.M\$	0
INTANGIBLE.M\$	33
PRECIO DEL PETROLEO.\$/STB	22.60
PRECIO DEL GAS.\$/MSCF ENTREGADO	0.00

## EVALUACION ECONOMICA

VALOR PRESENTE A 20.0%.M\$	517
ARROR.%	SOBRE 100
TIEMPO DE PAGO.ANOS	0.20
G/I DESCONTADO.\$/\$	17.16

CAMPO LOBITOS

FORMACION:PARINAS

POZO:LO10-18

AISLAMIENTO DE ZONA DE GAS (SQUEEZE)

MILES DE US. DOLARES

AÑO	BOPD	GOR	OIL (NET) MB/A.	GAS DEL'D MFCF	INGRESOS			OPER. COSTS	DEPRE- CIACION	AMORTI- ZACION	TAXABLE INCOME	INVERSION		FLOJO DE CAJA		
					OIL	GAS	TOTAL					TANG.	INTANG	IMPUESTOS	CURRENT	C.DSCTD
1	31	0	11.3	0.0	29	0	29	15	0	33	-19	0	33	-7	-13	-12
2	27	0	9.9	0.0	25	0	25	15	0	0	10	0	0	3	6	-7
3	24	0	8.8	0.0	22	0	22	15	0	0	7	0	0	3	5	-4
4	22	0	8.0	0.0	20	0	20	15	0	0	5	0	0	2	3	-2
5	21	0	7.7	0.0	19	0	19	15	0	0	4	0	0	2	3	-1
6	19	0	6.9	0.0	18	0	18	15	0	0	3	0	0	1	2	0
7	18	0	6.6	0.0	17	0	17	15	0	0	2	0	0	1	1	0
8	18	0	6.6	0.0	17	0	17	15	0	0	2	0	0	1	1	1
9	17	0	6.2	0.0	16	0	16	15	0	0	1	0	0	0	0	1
10	16	0	5.8	0.0	15	0	15	15	0	0	-0	0	0	-0	-0	1
TOTAL		0	77.7	0.0	197	0	197	150	0	33	14	0	33	5	9	

## PARAMETROS BASICOS

RESERVAS.MSTB	78
GAS ENTREGADO.XPRODUCIDO	0
INVERSION TOTAL.M\$	33
TANGIBLE.M\$	0
INTANGIBLE.M\$	33
PRECIO DEL PETROLEO.\$/STB	2.53
PRECIO DEL GAS.\$/MSCF ENTREGADO	0.00

## EVALUACION ECONOMICA

VALOR PRESENTE A 20.0 %.M\$	1
TASA DE RETORNO.X	18.8
TIEMPO DE PAGO.ANOS	3.44
G/I DESCONTADO.\$/\$	0.02

# POZO LOIO-18

## ESTADO MECANICO

ACTUAL

DURANTE EL SQUEEZE

DESPUES DEL SQUEEZE

PRUEBA SQUEEZE

PERFORAR TAPON

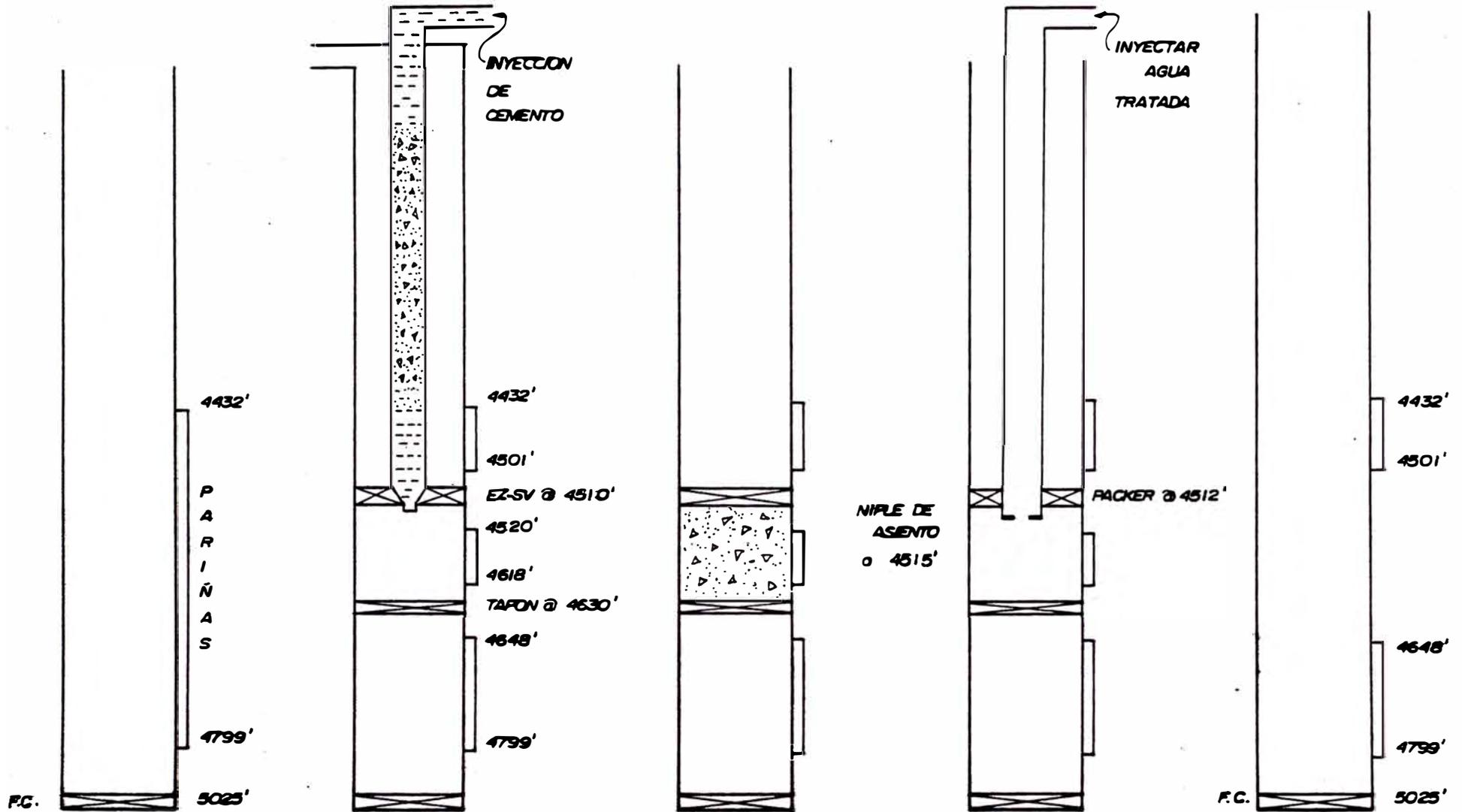


FIGURA I

